

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
katedra fyzické geografie a geoekologie



Alena Dutková

ÚSTUP HORSKÝCH LEDOVCŮ V ALPÁCH PO MALÉ DOBĚ LEDOVÉ A JEHO VZTAH KE ZMĚNÁM KLIMATU

ALPINE GLACIERS RETREAT AFTER LITTLE ICE AGE AND ITS RELATION
TO CLIMATE CHANGES

Bakalářská práce

Praha 2011

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Ivan Sládek, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 24.5.2011

podpis

.....

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce RNDr. Ivanu Sládkovi, CSc. za jeho odborné vedení, věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále pak Doc. RNDr. Jakubovi Langhammrovi, Ph.D. za jeho pomoc v oblasti statistického zpracování dat. Mgr. Janě Slačikové za cenné rady v oblasti zpracování družicových snímků a také Stefanovi Esch za jeho vstřícnou pomoc se sháněním odborné literatury. V neposlední řadě bych také ráda vyjádřila poděkování celé mé rodině a přátelům za podporu po celou dobu mého bakalářského studia.

Zadání bakalářské práce

Téma: ÚSTUP HORSKÝCH LEDOVCŮ V ALPÁCH PO MALÉ DOBĚ LEDOVÉ A JEHO VZTAH KE ZMĚNÁM KLIMATU

Cíl: Rešerše poznatků o vývoji horského zalednění a jeho klimatických příčinách a její shrnutí ve formě kritického referátu. V závislosti na možnostech získání relevantních vstupních dat eventuálně i vlastní původní příspěvek ke studiu daného problému.

Metody, území, zdroje dat: Metody matematické statistiky. Pokus o využití historických map a DPZ. Území – Alpy, data ze zdrojů v alpských zemích, zejména Rakousku a Švýcarsku, meteorologické služby, data o vývoji zalednění pravděpodobně ETH Zürich.

Datum zadání: listopad 2010

Jméno studentky: Alena Dutková

Podpis studentky:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Ivan Sládek, CSc.

Podpis vedoucího práce:

ABSTRAKT

Práce se zabývá ústupem horských ledovců v Alpách od malé doby ledové vzhledem ke klimatickým změnám. Teoretické poznatky získané z odborné zahraniční i tuzemské literatury jsou následně aplikovány na vybraný Morteratschský ledovec a vysokohorskou meteorologickou stanici Sonnblick. Alpské pohoří je jedno z nejvíce prozkoumaných a lidmi obydleným pohořím na světě, a proto jsou k dispozici dlouhodobé záznamy o vývoji teplot i fluktuaci ledovců.

Klíčová slova: klimatické změny, fluktuace ledovců, malá doba ledová, dálkový průzkum

ABSTRACT

This thesis deals with climatic changes and its influence on mountain glaciers in Alps since the little ice age to present. Knowledge published in domestic and foreign literature is applied to the example of Morteratsch glacier in swiss Alps and high elevation meteorological station Sonnblick in austrian Alps. Alpine mountain range is one of the most researched and the longest populated mountain ranges in the world. For this reasons we have for use long time period of meteorological and glaciological datasets.

Key words: climatic changes, glacier fluctuation, little ice age, remote sensing

OBSAH

1. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	- 8 -
2. ÚVOD A CÍLE PRÁCE	- 9 -
3. FYZICKO-GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA.....	- 10 -
3.1 ZÁPADNÍ ALPY	- 11 -
3.1.1 Vnitřní krystalické pásmo	- 11 -
3.1.2 Vnější krystalické pásmo.....	- 11 -
3.1.3 Severní vápencové pásmo	- 11 -
3.2 VÝCHODNÍ ALPY.....	- 12 -
3.2.1 Severní vápencové pásmo	- 12 -
3.2.2 Centrální krystalické jádro.....	- 12 -
3.2.3 Jižní vápencové pásmo	- 12 -
3.3 VODSTVO	- 12 -
3.3.1 Řeky	- 12 -
3.3.2 Jezera.....	- 13 -
3.4 FLORA.....	- 13 -
3.5 FAUNA	- 13 -
4. KLIMA	- 14 -
4.1 ALPSKÉ KLIMA.....	- 14 -
4.1.1 Teploty vzduchu	- 14 -
4.1.2 Atmosférické srážky.....	- 15 -
4.2 KLIMATICKÉ ZMĚNY.....	- 15 -
4.3 KOLÍSÁNÍ KLIMATU	- 15 -
4.4 PŘÍČINY KOLÍSÁNÍ KLIMATU.....	- 16 -
4.4.1 Příčiny změn klimatu v geologické historii Země	- 16 -
4.4.2 Solární konstanta.....	- 17 -
4.4.3 Vulkanická aktivita	- 19 -
4.4.4 Antropogenní faktor	- 19 -
4.5 HISTORICKÁ POZOROVÁNÍ KLIMATU	- 21 -
4.5.1 Malá doba ledová.....	- 21 -
4.5.2 19 - 21. století.....	- 22 -
4.5.3 Extrémně horké léto 2003	- 22 -
5. LEDOVCE	- 24 -
5.1 ZÓNA AKUMULACE, ZÓNA ABLACE LEDOVCE	- 24 -
5.2 ALPSKÉ ZALEDNĚNÍ.....	- 25 -
5.3 FLUKTUACE LEDOVců	- 25 -

5.4	METODY MĚŘENÍ LEDOVCŮ	- 27 -
5.4.1	Pozemní měření	- 27 -
5.4.2	Využití topografických map	- 27 -
5.4.3	Využití geoinformačních systémů a dálkového průzkumu Země.	- 29 -
5.5	ŠVÝCARSKÁ MĚŘENÍ	- 31 -
5.5.1	Současná švýcarská měření	- 32 -
5.5.2	Největší švýcarský ledovec	- 34 -
5.6	RAKOUSKÁ MĚŘENÍ	- 37 -
5.6.1	Austrian glacier inventory	- 37 -
5.6.2	Využití GIS v rakouských Alpách	- 38 -
5.6.3	Největší rakouský ledovec	- 38 -
6.	METODIKA A DATA	- 39 -
6.1	DLOUHODOBÝ VÝVOJ TEPLIT A FLUKTUACE LEDOVCŮ.	- 41 -
6.2	DATA	- 42 -
6.3	PRŮMĚRNÉ TEPLoty 1886 - 2010	- 42 -
7.	DISKUSE	- 45 -
8.	ZÁVĚR	- 46 -
9.	SEZNAM LITERATURY	- 47 -
9.1	BIBLIOGRAFIE	- 47 -
9.2	INTERNETOVÉ ZDROJE	- 50 -
9.3	ZDROJE DAT:	- 51 -
10.	SEZNAM PŘÍLOH	- 52 -

1. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

OBR. Č. 1: POZICE ALP V EVROPĚ.	- 10 -
OBR. Č. 2: LEDOVCOVÉ JEZERO BIELERSEE, ŠVÝCARSKO, 2008.	- 13 -
OBR. Č. 3: VÝVOJ WOLFOVA ČÍSLA V OBDOBÍ LET 1610-2000.....	- 18 -
OBR. Č. 4: PŮSOBENÍ JEDNOTLIVÝCH FAKTORŮ NA RADIAČNÍ BILANCI, 1850-1995.	- 19 -
OBR. Č. 5: SLEDOVANÉ ZMĚNY V GLOBÁLNÍ PRŮMĚRNÉ TEPLOTĚ V POROVNÁNÍ S TĚMI SIMULOVANÝMI KLIMATICKÝM MODELEM, OBDOBÍ 1861-1994.	- 20 -
OBR. Č. 7: PRŮMĚRNÉ TEPLOTY LETNÍCH MĚSÍCŮ (ČERVEN, ČERVENEC, SRPEN) VE ŠVÝCARSKU, 1909-2003.....	- 23 -
OBR. Č. 6: VLNA HORKA NAD EVROPOU V ROCE 2003.....	- 23 -
OBR. Č. 8: POLOHA ČÁRY ROVNOVÁHY NA LEDOVCI.	- 24 -
OBR. Č. 9: ENGSTLIGEN: 2. NEJVYŠŠÍ VODOPÁD ŠVÝCARSKA, 2010.	- 26 -
OBR. Č. 10: OBLAST RHEINWALD ANALYZOVANÁ POMOCÍ FCC (TM543), ŽLUTÁ LINIE PŘEDSTAVUJE ROZLOHU LEDOVCE V ROCE 1973 A ČERNÁ V ROCE 1999.	- 29 -
OBR. Č. 11: VYUŽITÍ SNÍMKU LANDSAT PŘI URČOVÁNÍ ROZSAHU LEDOVCE, HOCHJOCHFERNER, 17. ZÁŘÍ 1992.....	- 30 -
OBR. Č. 12: VYBRANÉ VÝSLEDKY NEW SWISS GLACIER INVENTORY, 2000.....	- 31 -
OBR. Č. 13: ZMĚNA DÉLKY VYBRANÝCH ŠVÝCARSKÝCH LEDOVců 1870 – 2009.	- 33 -
OBR. Č. 14: CELKOVÁ BILANCE VYBRANÝCH ŠVÝCARSKÝCH LEDOVců V LETECH 1980-2003.	- 33 -
OBR. Č. 15: ŠVÝCARSKÉ LEDOVCE PODLE OBJEMU V ROCE 1999.	- 34 -
OBR. Č. 16: LEDOVCOVÝ SPLAZ GROSSER ALTESCHGLETSCHER, 2010.	- 35 -
OBR. Č. 17: PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ TLOUŠTKY LEDOVCE, POVODÍ ŘEKY MASSA V ROCE 1999.....	- 36 -
OBR. Č. 18: PŘÍBLIŽNÁ POLOHA VYSOKÝCH TAUR V RAKOUSKU.	- 38 -
OBR. Č. 19: LOKALIZACE MORTERATSCHSKÉHO LEDOVCE.	- 39 -
OBR. Č. 20: MORTERATSCHSKÝ LEDOVEC V DOBĚ SIEGFRIEDSKÉHO MAPOVÁNÍ.	- 40 -
OBR. Č. 21: SATELITNÍ SNÍMEK OBLASTI MORTERARTSCHSKÉHO LEDOVCE V FCC BARVÁCH, 07-09-2009.....	- 40 -
OBR. Č. 22: LOKALIZACE SONBLICKKEES A OSTATNÍCH VÝZNAMNÝCH LEDOVců.	- 41 -
TABULKA Č.1: POČET LEDOVců A JEJICH ROZLOHA V ALPÁCH.....	- 26 -
TABULKA Č. 2: POČET RAKOUSKÝCH LEDOVců	- 37 -
GRAF Č. 1: FLUKTUACE MORTERATSCHSKÉHO LEDOVCE.	- 43 -
GRAF Č. 2: PRŮMĚRNÉ MĚSÍČNÍ TEPLOTY VYŠŠÍ NEŽ 0°C. SONNBLICK, 1988-2010.....	- 43 -
GRAF Č. 3: VÝVOJ PRŮMĚRNÉ ROČNÍ TEPLOTY, SONNBLICK, 1887-2010.	- 44 -

2. Úvod a cíle práce

Tato práce se zabývá problematikou ústupu horských ledovců a jejími souvislostmi s klimatickými změnami za více než 100 let od tzv. malé doby ledové. Zájmovým územím jsou Alpy, především jejich švýcarská a rakouská část. Hlavní náplní práce je rešerše české i zahraniční odborné literatury zabývající se problematikou klimatu, klimatickými změnami, ústupem a metodikou měření ústupu alpských ledovců a jejich reakcí v závislosti s klimatickými změnami.

Základním předpokladem je závislost ústupu horských ledovců v Alpách na klimatických změnách. Konkrétně se to snažím přiblížit v porovnání naměřených teplot ve vysokých nadmořských výškách s daty o fluktuaci ledovce. Toto porovnání je ukázáno na vybraném Morteratschském ledovci a meteorologické stanici Sonnblick.

Dále se snažím co nejnázorněji tento předpoklad prokázat na starých mapách a nových satelitních snímcích. Pro ukázkou jsem vybrala opět oblast Morteratschského ledovce.

Grafy jsem vytvořila z poskytnutých dat měsíčních průměrných teplot od *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* (ZAMG-Salzburg), jež velkoryse poskytl data z vysokohorské meteorologické stanice Sonnblick a z dat fluktuace Morteratschského ledovce, jež jsou volně ke stažení na internetovém serveru *Schweizerisches Gletschermessnetz* (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>), který je pod správou *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* (ETH Zürich). Pro všechny výpočty byly užity metody matematické statistiky.

3. Fyzicko-geografická charakteristika

Alpy jsou mladé pásemné pohoří, které bylo vyvrásněno ze dna geosynklinály Tethys (Votýpka, 1994), jež má za následek kolize Africké litosférické desky s deskou Euroasijskou. Africká litosférická deska vyvíjí tlak, při kterém se podsouvá pod desku Euroasijskou (Král, 1999). Tento proces, jak uvádí Votýpka (1994), začal již na konci druhohor, ale celý proces vyvrcholil ve třech fázích třetihor: v eocénu, oligocénu a miocénu. Mezi těmito fázemi orogeneze vždy nastupovala fáze rozsáhlé peneplenizace, která zarovnávala nově vzniklý povrch.

Vymezení hranic celého horského systému je poměrně jednoduché, neboť hranice jednotlivých celků jsou jasně patrné. Celý alpský oblouk (obr. č. 1) je vyklenutý k severu a jeho maximální šířka je kolem 250 km a délka 1 200 km (Votýpka, 1994). Nejvyšší horou je se svými 4 810 m n. m. Mont Blanc, ležící na hranici Francie a Itálie.

Podle orografie se Alpy rozdělují na západní a východní, jejichž hranice je dána linií mezi jezery Lago di Como a Bodensee, kde západní příkrovy spadají pod příkrovy východní (Votýpka, 1994). Toto dělení je běžné pro německy mluvící země a je přijímáno také Francií, ovšem Itálie rozlišuje ještě Střední Alpy, jež se rozkládají mezi průsmyky Simplon a Brenner (Král, 1999).



Obr. č. 1: Pozice Alp v Evropě.
Zdroj: Bičík, a kol., 2000.

3.1 Západní Alpy

Jsou o něco užší než Východní Alpy, avšak mají všeobecně vyšší nadmořskou výšku. Dělí se na dvě základní pásma vápencové a krystalické (vnější a vnitřní) (Votýpka, 1994).

3.1.1 Vnitřní krystalické pásmo

Převážně tvořeno metamorfovanými horninami jako jsou ortoruly či břidlice. Vyzdvihují se z mořského pobřeží jako Ligurské Alpy s maximální výškou kolem 2 650 m. Dále pak přechází v Alpy Kottické a Grajské, jejichž výška již přesahuje 4 000 m a najdeme zde první ledovce. Penninské Alpy, na švýcarské straně známé jako Walliské Alpy, jsou nejvyšším celkem tohoto pásma s nejvyšším masivem Monte Rosa (4 634 m n. m) (Votýpka, 1994).

3.1.2 Vnější krystalické pásmo

Jak uvádí Votýpka (1994) pásmo probíhající paralelně s vnitřním krystalickým jádrem, tvořené převážně starými variskými orogény, na něž byly nasunuty helvétské příkrovy. Nalezneme zde nejvyšší alpský masiv Mont Blanc, s variským jádrem. Vysokou průměrnou výškou se vyznačují Bernské Alpy, které jsou z velké části zaledněny a nachází se zde největší alpský ledovec Aletsch Gletscher. Tento ledovec je dlouhý 22,9 km (Seiz, Foppa, 2007).

3.1.3 Severní vápencové pásmo

Pásmo, tvořeno převážně helvétskými a austrijskými příkrovy, vznikalo v juře a křídě. Nejčastěji zde nalezneme vápence a slínovce. Jelikož je tento celek poměrně nízký, tvoří rozsáhlé pásmo alpského předhůří. Nalezneme zde i tělesa vulkanického původu. Patří sem například Dauphinéské a Savojské Alpy. Ve švýcarské části se rozkládá mezihorská deprese zvaná Mittelland, v níž leží největší švýcarská ledovcová jezera: Ženevské, Neuchatelské a Bodamské (Votýpka, 1994).

3.2 Východní Alpy

Východní Alpy jsou nižší než Západní Alpy, ovšem jsou značně symetričtější. Vymezuje se pásmo severní, jižní a centrální krystalinické pásmo (Votýpka, 1994).

3.2.1 Severní vápencové pásmo

Navazuje na Západní Alpy, kde tvoří předhorské hřebeny jež jsou na Z ještě poměrně vysoké, ovšem směrem k V a S se snižují. Od centrálních Alp je dělí povodí řek Illu, Innu a Emže a Mury. Patří sem například Alpy Lechthalské, Severotyrolské, či Salcburské a jsou tvořena převážně vápenci a slíny (Votýpka, 1994).

3.2.2 Centrální krystalické jádro

Nalezneme zde známé Vysoké Taury, Ötztalské, Stubajrské, Zillertalské, nebo Kitzbühlské Alpy, jež jsou tvořeny převážně rulami, svory, žulami a také krystalickými břidlicemi. Ve Vysokých Taurách se nachází nejvyšší vrchol Rakouska Grossglockner (3798 m n.m.) (Votýpka, 1994).

3.2.3 Jižní vápencové pásmo

Tvořeny převážně vápenci a dolomity, ovšem nalezneme zde i mnoho tektonických zlomů, podél kterých docházelo k výronu eruptivních hornin. Nachází se zde Ortlerské, Benátské, Karnské a Julské Alpy (Votýpka, 1994).

3.3 Vodstvo

Prochází zde hlavní evropské rozvodí, jež dělí řeky do úmoří Středozevního a Severního moře.

3.3.1 Řeky

Pramení zde významné evropské řeky, jako je Dunaj, Rýn, Pád či Rhône. Nejvyšší vodnost těchto řek je na jaře, způsobená táním sněhové pokrývky a v létě, kdy čerpají vodu z ledovců. Energetický potenciál těchto řek je vysoký, avšak spád je značně nevyrovnaný s častým výskytem peřejí a vodopádů (Votýpka, 1994).

3.3.2 Jezera

Většina jezer je ledovcového původu (obr. č. 2), jakožto pozůstatek dob ledových. Nejčastěji to jsou pak jezera údolní hrazená ústupovými morény. Největšími jezery jsou Ženevské, Bodamské a Neuchâtelské, která jsou ledovcového původu a na jihu je to třeba jezero Lago Maggiore, které vyplňuje tektonickou kotlinu (*Votýpka, 1994*).



Obr. č. 2: Ledovcové jezero Bielersee, Švýcarsko, 2008.
Zdroj: foto autorka

3.4 Flora

Podle *Votýpky* (1994), má alpská oblast hojnou vegetaci, která se na svazích projevuje výraznými vegetačními pásmy. Najdeme zde převážně jehličnany (smrk, modřín, borovice), ale na teplých stanovištích i listnáče (hlavně buk). Horní hranice lesa končí přibližně v nadmořské výšce kolem 2200 m a nad ní pokračuje jen úzký pás křovin (kosodřevina, olše, vrba). Dále tyto křoviny přechází v alpské trávníky nejprve s vysokými bylinami (ocúny, lilie, cykamen) a následně s nízkými polštářovitými porosty tundrového typu. Pokud jsou hřebeny vysoké, navazuje na tundrový typ vegetace jen pustiny, kde se objevují firnoviště, či skalní sutě.

3.5 Fauna

Horská úbočí jsou stanovištěm mnoha druhů. Mezi původní evropskou zvěřou patří například jelen, srnec, vlk či liška. Ve vyšších nadmořských výškách nalezneme hojně zastoupeného kamzíka horského, ale také vzácného kozoroha. Z menších druhů je zde zastoupen například svišť, rys, zajíc běláček či bělokur sněžný. Skalní výchozy obývá orel skalní a v čirých ledovcových řekách žijí především pstruhovité ryby (*Votýpka, 1994*).

4. Klima

V této kapitole jsem se zaměřila na definování alpského klimatu, klimatických změn, kolísání klimatu a příčiny, jež způsobují jeho kolísání.

4.1 Alpské klima

Jelikož mají Alpy převážně rovnoběžkový směr, působí jako výrazná hradba a klimatická hranice, jež brání pronikání chladného severního vzduchu do jižních oblastí a naopak teplého středomořského vzduchu do střední Evropy (*Votýpka, 1994*).

Podle Krále (1999) v Alpách převládá horské klima, jež se vyznačuje výškovou zonálností. Pro horské klima je typické ubývání teplot vzduchu a přibývání srážek s nadmořskou výškou. Ovšem v Alpách je toto výrazně ovlivněno místními podmínkami, jako je expozice svahu, směr údolí a horských hřbetů, nebo úhel dopadu slunečních paprsků na zemský povrch. Jižní svahy tedy dostávají přibližně 8-10krát více tepla oproti svahům severním. Vyskytují se zde výrazné teplotní rozdíly během dne a noci, nebo létem a zimou. V porovnání s nížinami se stejnou zeměpisnou šířkou, jsou hory chladnější. Návětrné svahy bývají srážkově bohatší, oproti svahům závětrným, kde je minimum srážek v důsledku srážkového stínu.

Srážky na návětrné straně vznikají pomocí pseudoadiabatického procesu při přetékání vzduchu přes horské masivy. Tímto procesem vzniká také typický jev zvaný *fén*, který se vyskytuje nejenom v Alpách, ale například i v západním Kavkazu a v Skalnatých horách. Je to suchý, teplý, padavý vítr na závětrné straně vysokých horských překážek (*Netopil, a kol., 1984*).

4.1.1 Teploty vzduchu

Jak uvádí Král (1999), často zde dochází k teplotní inverzi, kdy se v kotlinách drží chladný těžký vzduch. Zajímavé je to na pozorování teplotních minim. V kotlinách naměřené absolutní švýcarské minimum $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ na meteorologické stanici La Brévine se nachází v oblasti zvané „Švýcarská Sibiř“. Absolutní minimum $-52,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pak bylo naměřeno v krasové sníženině Gstettner Alm v dolnorakouských Alpách.

„Změnu teploty s výškou charakterizujeme v meteorologii pomocí tzv. vertikálního teplotního gradientu, který určujeme většinou pro interval výšky 100 m“ (Netopil, a kol., 1984). V průměru klesá teplota vzduchu v troposféře o 0,6 °C/100 m, avšak mění se nerovnoměrně. Záleží na denní a roční době a také poloze místa (Netopil, a kol., 1984). Rozdíl teploty vzduchu v nížině a na vrcholku hor tedy může při převýšení 2000 m, které je vcelku běžné pro alpskou oblast, činit rozdíl i 12 °C.

4.1.2 Atmosférické srážky

Rozložení srážek je podle literatury značně nevyrovnané, vzhledem k návětrným a závětrným svahům. V Západních Alpách na návětrných svazích činí roční srážkové úhrny 3000-3500 mm, zatímco v mezihorských kotlinách, kde je srážkový stín, jsou roční srážky kolem 500-700 mm. Směrem na V a do nitra srážek postupně ubývá (Král, 1999). A to v důsledku převládajícího západního cyklonálního proudění, které způsobuje větší výskyt srážek na západním okraji pevniny a postupně směrem do středu a dále na východ srážek ubývá. Toto proudění je typické hlavně pro mírné zeměpisné šířky (Netopil, a kol., 1984).

4.2 Klimatické změny

Projevem nestálosti klimatického systému jsou klimatické změny, během nichž dochází ke změně meteorologického režimu. O změně klimatu můžeme hovořit, jedná-li se o změnu klimatotvorných faktorů a je-li tato změna dlouhodobá (v časovém intervalu porovnatelném s geologickými epochami) (Brázdil, 1984).

4.3 Kolísání klimatu

V intervalech kratších, můžeme hovořit o změnách trendu meteorologických prvků. Takovéto změny označujeme jako kolísání klimatu (Brázdil, 1984), které způsobují periodické nebo rytmické změny podnebí. Nemají progresivní charakter tudíž nejsou jednostranné (Vysoudil, 2004).

4.4 Příčiny kolísání klimatu

Jak uvádí Lean a Rind (1999), od malé doby ledové došlo k oteplení zemského povrchu přibližně o 0,8 °C. Nárůst obsahu skleníkových plynů v atmosféře je všeobecně přijímán, jako primární antropogenní faktor způsobující dnešní klimatické změny, avšak v preindustriálním období docházelo také ke kolísání teploty, bez ohledu na víceméně stabilní množství skleníkových plynů obsažených v atmosféře.

4.4.1 Příčiny změn klimatu v geologické historii Země

Velké množství hypotéz se zabývá příčinami změn klimatu v geologické historii Země. Ovšem žádná z nich není všeobecně přijímána, vzhledem ke složitosti klimatu jako celku (Brázdil, 1984).

Hypotézy podle Brázdila (1984) jež vysvětlují kolísání klimatu nyní , ale i v minulosti:

- *Příčiny terestrické* – vznik glaciálů založen na snížené propustnosti atmosféry, způsobené zvýšenou vulkanickou činností.
- *Astronomická hypotéza* – založena na změnách parametrů orbity Země (sklon ekliptiky, délky perihélia a excentricity).
- *Hypotéza orografická* – založena na tektonických pohybech zemské kůry, jež následně ovlivňují klimatotvorné faktory.
- Autorem teorie *samovolného růstu ledovců* je C. E. P. Brooks – tato teorie předpokládá samovolný nárůst ledovce, dosáhne-li plocha ledovce alespoň 1 °z. š., kdy se projeví jeho vlastní ochlazující vliv.
- *Dlouhodobé kolísání solární konstanty* – pravděpodobně pokles či vzestup solární konstanty způsobuje ochlazování či oteplování Země (Vysoudil, 2004).
- *Kolísání sluneční aktivity* – tok záření, který jde k Zemi od Slunce se může měnit, i když je solární konstanta stabilní. Jde zde hlavně o vliv na všeobecnou cirkulaci atmosféry (Vysoudil, 2004).
- *Kolísání obsahu CO₂ v atmosféře* – vzestup či pokles koncentrace CO₂ v paleozoiku, mezozoiku a větší části třetihor, vyvolalo oteplení či ochlazení až o několik °C (Vysoudil, 2004).

4.4.2 Solární konstanta

Solární konstanta vyjadřuje „celkovou intenzitu elektromagnetického záření dopadajícího na horní hranici atmosféry na jednotkovou plochu kolmou k paprskům při střední vzdálenosti Země od Slunce“ (Prošek, 1984). Její hodnota se v dnešní době pohybuje kolem $1367 \pm 6 \text{ W.m}^{-2}$. Jelikož tato veličina záleží přímo úměrně na čtverci vzdálenosti od zdroje, mění se během roku (Prošek, 1984).

Je jisté, že změna solární konstanty hraje v procesu klimatických změn svou roli, ale zatím není zcela jasné, jak výrazně změny klimatu ovlivňuje (National Research Council, 1982 in Lean, Rind, 1999).

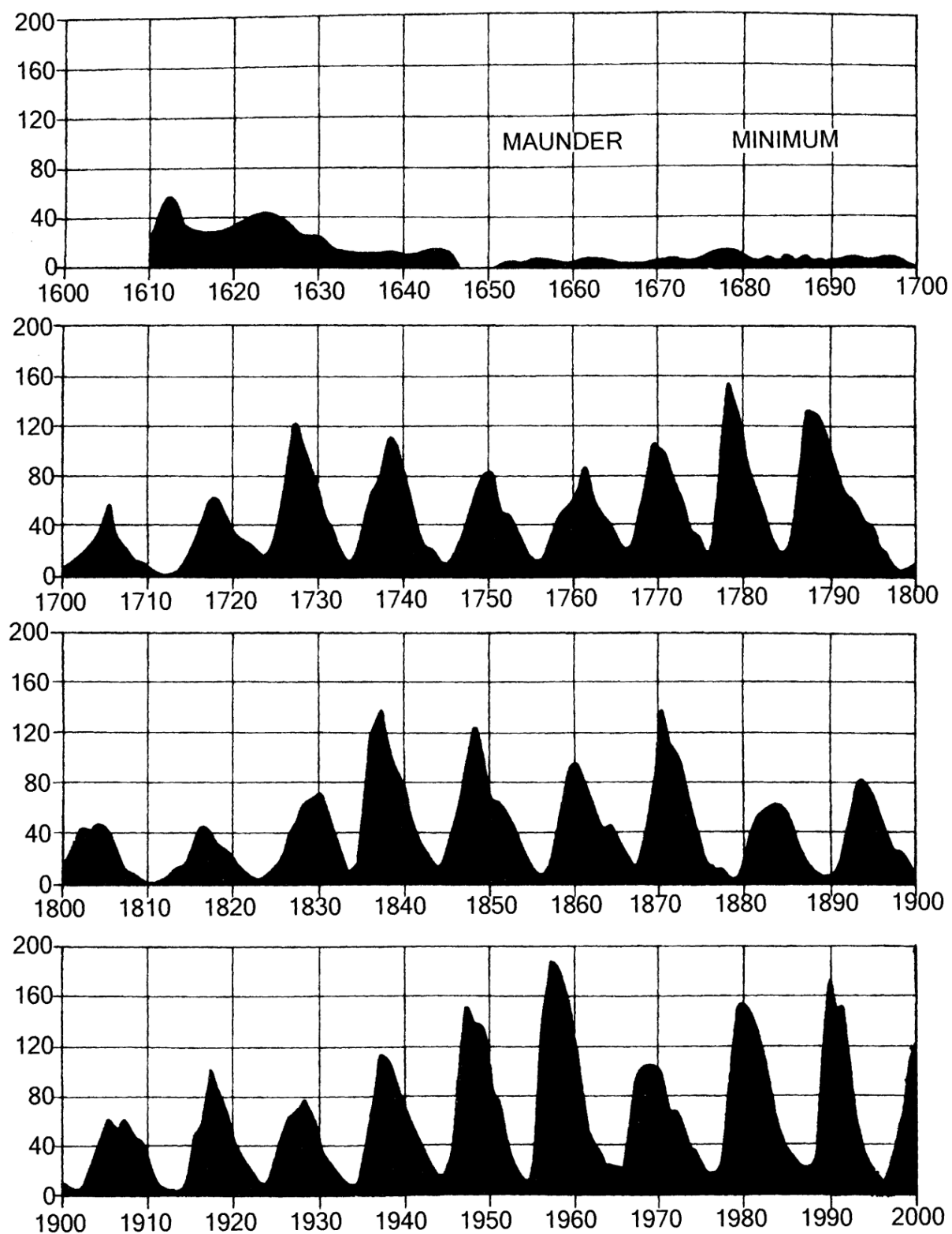
Obrázek č. 3 zobrazuje vývoj Wolfova čísla sluneční aktivity. Jak uvádí Schwarzbach (1961) dosahuje číslo svého maxima a minima přibližně v 11letých intervalech (může být i 7-17 let) a způsobuje tak kolísání sluneční aktivity. Číslo je určeno rovnicí:

$$R = 10g + f$$

g...množství skupin slunečních skvrn

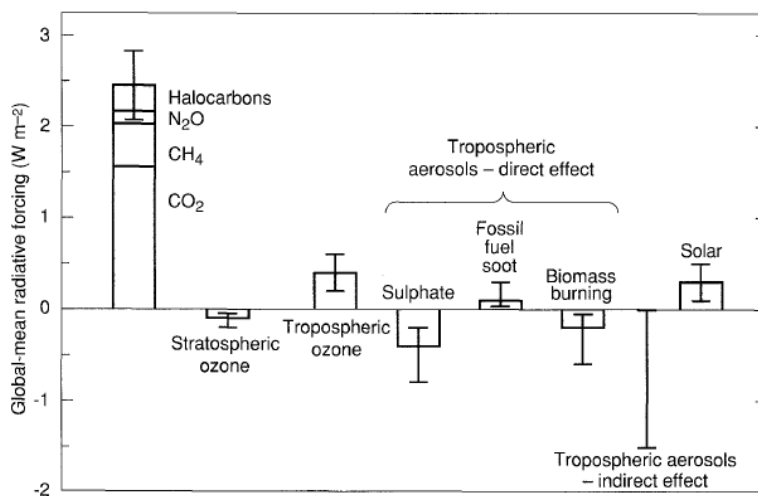
f...množství jednotlivých skvrn

Zároveň také obrázek zobrazuje období zvané Maunderovo minimum (cca 1645-1715), období extrémně nízké sluneční aktivity (Lean, 1995), jež je charakteristické pro malou dobu ledovou (Barry, Chorley, 2003). Lean (1995) uvádí, že v období 1610-1800 se rekonstrukce vývoje sluneční aktivity shoduje spolu s celkovým vývojem oteplením na 74 %. Kdežto od roku 1800 do současnosti to je již pouze 54 %. Proto, jak uvádí Lean a Rind (1999), je nejvíce diskutovaný vztah mezi klimatickými změnami a sluneční aktivitou v industriálním období. Některé studie uvádí sluneční aktivitu jako hlavní faktor způsobující klimatické změny, některé studie jej naopak zcela opomíjí a další jej uvádí jako faktor, jež má na změny klimatu jen částečný podíl. Jinými slovy se podíl sluneční aktivity na změnách klimatu v poslední době, zvláště v případě stoupající koncentrace skleníkových plynů, mění a z hlediska nedostatečně dlouhodobých záznamů není zcela možné její vliv charakterizovat.



Obr. č. 3: Vývoj Wolfova čísla v období let 1610-2000.
Zdroj: Barry, Chorley, 2003.

Vyobrazení předpokládaného podílu radiačního působení jednotlivých složek na změnách radiační bilance v období 1850-1995 je na obrázku č. 4. Konkrétně se jedná o míru působení (zleva) skleníkových plynů, stratosférického a troposférického ozónu, troposférických aerosolů a slunečního záření. Sloupec vždy vyznačuje průměrnou hodnotu daného faktoru a úsečka vyznačuje interval spolehlivosti, daný prostorovým rozložením jednotlivých faktorů.



Obr. č. 4: Působení jednotlivých faktorů na radiační bilanci, 1850-1995.
Zdroj: IPCC (1995).

4.4.3 Vulkanická aktivita

Kromě antropogenního zvyšování obsahu CO₂ se ve 20. století vysvětluje kolísání klimatu také zvýšenou propustností atmosféry. V tomto období nedošlo během 30let k výbuchu žádné významnější sopky, což by ovlivnilo průzračnost atmosféry a tedy zabránilo zvyšování teploty (Budyko, 1971, 1977, 1980 podle Brázdil, 1984).

4.4.4 Antropogenní faktor

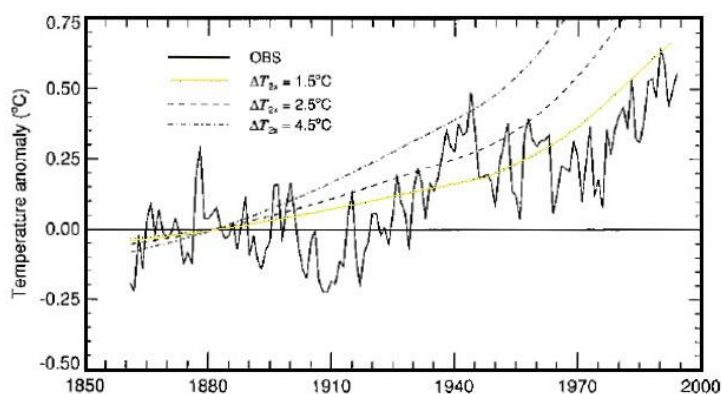
„Změny koncentrace CO₂ v atmosféře závisí na poměru mezi emisí CO₂ z různých zdrojů a jeho pohlcováním vegetací a povrchem oceánů.“ (Sládek, 1984). Ovšem během posledních 25 let se začíná měnit výrazně poměr faktorů, způsobující klimatické změny. Činnost člověka, který v minulosti hrál zanedbatelnou roli ve změnách klimatu, začíná mít převahu nad faktory přírodními (solární konstanta, vulkanický prach) (Solomina, et al., 2008). Ve zprávě IPCC (1995) má vzestup koncentrace skleníkových plynů od preindustriálního období za následek oteplování zemského povrchu a další klimatické změny. Obrázek č. 5 zobrazuje teplotní anomálie (teploty vysoce nadprůměrné, či podprůměrné vzhledem k dlouhodobému průměru) v období 1861-1994. Spojitou černou linií je vyznačena naměřená průměrná globální teplota v období 1961-1994, čárkovaně a

žlutě jsou pak vyznačeny teploty simulované pomocí klimatického modelu. Tento model v obrázku počítá pouze se skleníkovými plyny. ΔT je tzv. *parametr klimatické sensitivity* a určuje míru citlivosti klimatu na vnější vlivy. Většinou je citlivost klimatu vyjadřována jako oteplení vzhledem ke zdvojnásobení obsahu CO_2 v atmosféře. Tedy $\Delta T_{2x}=1,5^\circ\text{C}$ (v obrázku žlutě) představuje oteplení o $1,5^\circ\text{C}$ při zdvojnásobení obsahu CO_2 (IPCC, 1995).

Koncentrace CO_2 vzrostla o 30 % (z 280 ppmv v preindustriálním období na 358 ppmv v roce 1994), CH_4 o 145 % a N_2O o 15 %, což je dááno za vinu především lidské činnosti (spalování fosilních paliv, změna využívání půdy, atd.).

Podle Brázdila (1984) se člověk podílí nejvíce na:

- růstu obsahu CO_2
- růstu tepelného znečištění atmosféry
- růstu obsahu antropogenních aerosolů



Obr. č. 5: Sledované změny v globální průměrné teplotě v porovnání s těmi simulovanými klimatickým modelem, období 1861-1994. Zdroj: IPCC, 1995.

4.5 Historická pozorování klimatu

Jak uvádí Brázdil (1984) z doby, kdy ještě nebyla vybudována síť mnoha meteorologických stanic, jakou máme teď, jsou dostupné pouze kroniky a zápisky jednotlivců, které je třeba brát značně kriticky, avšak mohou nám mnohé napovědět. Například v Japonsku byl dlouhodobě zaznamenáván den s první sněhovou pokrývkou. Další možností jak se dozvědět více o vývoji klimatu Země v minulosti je studium paleoklimatu (klima v geologické historii Země), jímž se zabývá paleoklimatologie (Vysoudil, 2004).

V historické době neustále docházelo ke kolísání klimatu. Obzvláště příznivé podmínky nastaly v období tzv. klimatického optima v holocénu v letech 1150 – 1300, proto se například zejména v Anglii rozvíjelo vinařství. Naopak léta 1590 – 1850 v Evropě znamenala výrazné ochlazení nazývaní se malá doba ledová, kdy nejvýznamnější ochlazení připadalo na 17. století. Mnoho horských ledovců se tehdy opět zformovalo a existující značně zvětšily svůj rozsah. (Brázdil, 1984).

4.5.1 Malá doba ledová

Jak uvádí Grove (1988), pojem malá doba ledová poprvé použil Matthes v roce 1939 ve vědecké literatuře. Jeho záměrem bylo popsat období následující po nejteplejší fázi holocénu. Nyní pojem malá doba ledová obecně označuje období, trvající několik století mezi středověkem a teplým obdobím první poloviny 19. století. Toto období se vyznačovalo převážně studeným klimatem a následným rozšířením alpských ledovců. Vymezení tohoto období je již poměrně nejasné a mnoho autorů se zde rozchází. Lamb (1966) podle Brázdila (1984) uvádí léta 1550 až 1700 a samotný Brázdil (1984) zas léta 1590 až 1850. Podle Schwarzbacha (1961) začala malá doba ledová v 16. století a trvala až do konce 19. století. Zato Grove (1988) uvádí 13. století jako začátek a polovinu 16. a polovinu 19. století jako dva vrcholy malé doby ledové. A podle Schwarzbacha (1961) jsou zde tři fáze výraznějšího rozšiřování ledovců:

- polovina 17.stol.
- 1810 – 1820
- 1850 – 1860

Nejvíce se projevila v Evropě a severoatlantské oblasti. Ovšem i v rámci malé doby ledové se objevují roky s teplejším klimatem.

Jak uvádí Grove (1988), v historii lidstva byla tato doba zaznamenána v kronikách a zápiscích jednotlivců, jako doba, kdy byly studené zimy a vlhká léta. Úroda vína a obilí byla zničena, což vedlo k hladomorům. Možnosti lodní dopravy v severním Atlantiku se snížily a norské kolonie na pobřeží Grónska byly odříznuty od zbytku norského obyvatelstva v kontinentální Evropě, kvůli zvýšení výskytu ledových ker v severním Atlantiku. Stejně tak byl izolován ostrov Island od Skandinávie.

Podle Behringera (2010) je čarodějnictví dokonce považováno za charakteristický zločin malé doby ledové, neboť čarodějnice byly odsuzované za nepřízeň počasí, neúrodnost polí, bezdětnost a v neposlední řadě také za neobvyklé nemoci, které v této době postihovaly obyvatelstvo, jež si je neumělo vysvětlit.

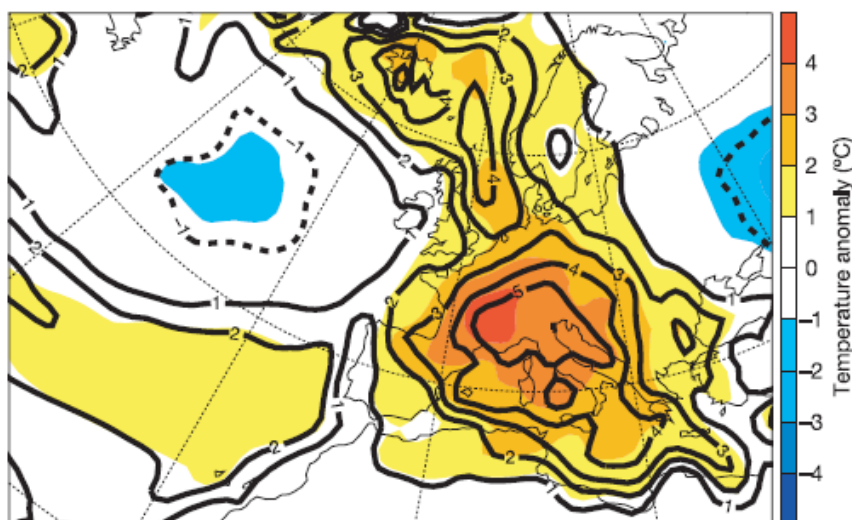
4.5.2 19 - 21. století

Od 2. poloviny 19. století se začíná podle Brázdila (1984) objevovat tendence oteplování zemského klimatu na severní polokouli. Tato tendence následně vyvrcholila ve 20. století, kdy od 80. let můžeme pozorovat zrychlený nárůst teploty vzduchu. Maximum bylo dosaženo ve 30. letech a průměrná teplota vzrostla o 0,6 °C v porovnání s 19. stoletím. Od 40. let docházelo k opětovnému ochlazení, jehož vrchol nastal v 60. letech, kdy opět pozorujeme postupné zvyšování teploty. Nejlépe viditelné toto oteplování je ve vysokých zeměpisných šířkách v chladném půlroce. Projevuje se to zmenšením horských ledovců, posunem jižní hranice permafrostu k severu a zmenšováním meridionálního gradientu teploty (přenos vlhkého oceánského vzduchu nad pevninu), což má za následek úbytek srážek ve vnitrozemí.

4.5.3 Extrémně horké léto 2003

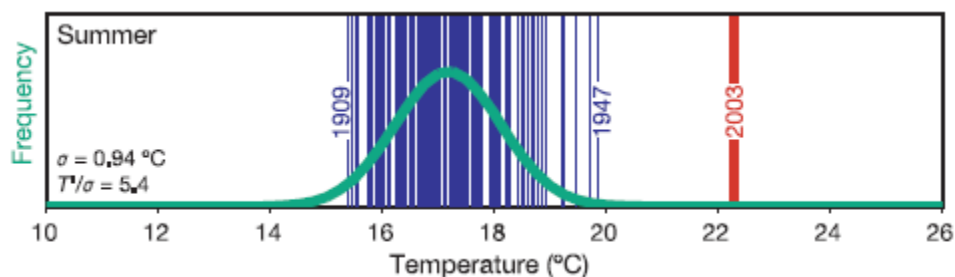
Jak uvádí Schär, et al. (2004), vlna horka, která se přehnala přes velkou část Evropy v létě 2003 lámala veškeré rekordy. Ve Švýcarsku byl dlouhodobý teplotní průměr letních měsíců (červen, červenec, srpen) z období 1961-1990 překročen o 5 °C a ve zbytku střední Evropy byl překročen o 4 °C. Obrázek č. 6 ukazuje teplotní anomálie (°C), vypočítané na základě projektu ERA 40 pro období 1961-1990 (Simmons, Gibson, 2000 in Schär, et al., 2004). Jde o měsíční průměry vypočítané z denních maximálních a minimálních teplot.

Pomocí barev jsou zobrazeny teplotní anomálie v roce 2003 a černá linie znázorňuje 30letou standardizovanou odchylku teplotních anomálií (Schär, et al., 2004).



Obr. č. 6: Vlna horka nad Evropou v roce 2003.
Zdroj: Schär, et al., 2004.

Obrázek č. 7 znázorňuje do jedné řady sloučené průměrné letní měsíční teploty čtyř vybraných švýcarských meteorologických stanic (Basel-Binningen, Geneva, Bern-Liebelfeld a Zürich), které jsou vybrány tak, aby byly co nejméně ovlivněny lokálními meteorologickými podmínkami. Řada začíná rokem 1964 a končí rokem 2003 a jak je patrné, léto 2003 výrazně přesahuje všechny dosavadní průměrné teploty. Samozřejmě, že v předešlých letech, také docházelo k překonávání rekordů co se týče teplot jednotlivých měsíců, ale léto 2003 bylo unikátní z toho důvodu, že šlo o dlouhodobě nadprůměrně vysoké teploty. Do budoucna je velmi pravděpodobné, že se takovéto extrémní výkyvy teplot, vzhledem ke globálnímu oteplování, budou vyskytovat v mnohem častěji (Schär, et al., 2004).



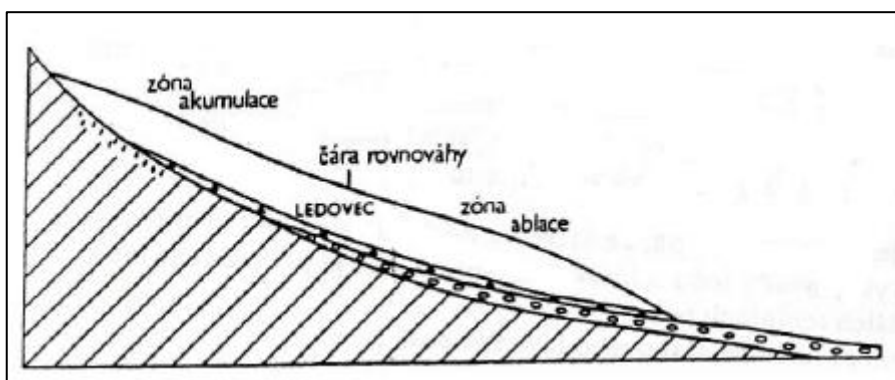
Obr. č. 7: Průměrné teploty letních měsíců (červen, červenec, srpen) ve Švýcarsku, 1909-2003.
Zdroj: Schär, et al., 2004.

5. Ledovce

Vznikají přeměnou zrnitého ledu (firnu) působením tlaku vyšších vrstev, které se hromadí v místech s negativní tepelnou bilancí, tedy místech, kde je přírůstek sněhu vyšší než jeho úbytek. Hustota firnového ledu je $0,84 \text{ g*cm}^{-3}$ a působením tlaku se zvýší na hustotu ledovce, jež je $0,90 \text{ g*cm}^{-3}$. Přičemž nejdůležitějším faktorem při vzniku ledovců jsou pevné srážky a zároveň negativní tepelná bilance. Dalším důležitým faktorem jsou teploty letních měsíců a nikoliv zimní absolutní minima (Kříž, 1982).

Sněhová čára je linie určující hranici zemského povrchu se souvislou sněhovou pokrývkou. Její výška závisí na klimatických podmínkách, jako je negativní tepelná bilance především v létě a množství pevných srážek především v zimě. Její poloha se tedy v průběhu let mění v závislosti se změnami klimatických podmínek (Demek, 1987).

Čára rovnováhy (obr. č 8), neboli *equilibrium line* v angličtině, odděluje na ledovci zónu akumulace od zóny ablace (viz 5.1) (Demek, 1987).



Obr. č. 8: Poloha čáry rovnováhy na ledovci.
Zdroj: Price, 1973 podle Demka, 1987.

5.1 Zóna akumulace, zóna ablace ledovce

Horské ledovce přibývají na objemu v případě, když *akumulace* tuhých srážek v podobě sněhu v zimě je vyšší, než letní úbytek sněhu, způsobený ablací (Ritter, 2006). *Srážky* by tedy měly být ve formě sněhu, nikoliv deště a musí mít pozitivní bilanci, aby způsobily nárůst ledovce (Waldinger, 1999). *Ablace* je ztráta sněhu způsobená sublimací, větrnou erozí, táním a evaporací. *Zónu akumulace* určuje ta část ledovce, ve které převyšuje akumulace nad ablací a naopak. *Zóna ablace* je ta část ledovce, kde je úbytek

ledu vyšší než jeho přírůstek. Jak je uvedeno výše, mezi těmito zónami se nachází *čára rovnováhy* v anglické literatuře často označována jako *equilibrium line* (Ritter, 2006).

Ledovce jsou spojeny s atmosférou výměnou energie, která způsobuje akumulaci, či ablaci během roku. Dlouhodobé změny v objemu a délce ledovců, jsou brány jako indikátory představující změny klimatu (Seiz, Foppa, 2007).

Rozděluje je do tří základních skupin: *pevninské* (kontinentální, inland), *horské* a *úpatní* ledovce. Pevninské ledovce zaujímají rozlehlé oblasti severních i jižních polárních oblastí a jsou největšími zásobárnami pitné vody na světě (Kříž, 1982). Ovšem v této práci se zaměřuji pouze na ledovce horské, které se nachází v Alpách.

5.2 Alpské zalednění

Jak uvádí Král (1999), ve čtvrtohorách bylo v Alpách rozlišeno několik dob ledových, které výrazně ovlivnily dnešní alpský reliéf. Tato období jsou známá jako: günz, mindel, riss a würm. Zalednění, které se tehdy v Alpách vyskytovalo, pokrývalo víceméně celou plochu Alp. Z ledu vyčnívaly pouze horské hřebeny v podobě nunataků a ledovcové splazy se šířily hluboko do předpolí Alp, kde po ústupu zanechávaly vysoké morénové valy. Typickými ledovcovými útvary jsou především vysoká ledovcová údolí, která mají často v podélném profilu stupňovitý charakter, jež dává za vznik vysokým vodopádům (obr. č. 9). Dalšími glaciálními útvary jsou morény, kary, drumliny, oblíky a jezera. Boční údolí jsou převážně visutá, jelikož se zde v době čtvrtohorního zalednění připojoval vedlejší ledovcový splaz k hlavnímu splazu ledovce.

5.3 Fluktuace ledovců

Jak uvádí Rott (1993), vývoj ledovců ve švýcarských a rakouských Alpách je podle historických dokumentů za uplynulých 400 let velmi podobný. V této době měly ledovce maximální rozsah v malé době ledové v 17. století a dalších 250 let zůstaly přibližně ve stejném stavu. Od roku 1850 začaly postupně ubývat až do roku kolem 1965, tento úbytek byl narušen pouze několika málo období, kdy ledovce opět trochu zvětšily svůj rozsah. Tato období jsou 1890-1920 a 1977-1982. V polovině 80. let opět začínají ledovce výrazně snižovat svůj objem, hlavně kvůli horkým létům a nižším srážkám.



Obr. č. 9: Engstligen: 2. nejvyšší vodopád Švýcarska, 2010.
Zdroj: foto autorka

Přibližný počet ledovců v Alpách je 4 300, jenž dohromady zaujímají plochu přibližně 2 600 km².

Tabulka č.1: Počet ledovců a jejich rozloha v Alpách

Země	počet	rozloha [km ²]
Švýcarsko ¹	1828	1342
Itálie	1400	608
Rakousko ²	925	542
Francie ³	133	350
CELKEM	4286	2842

Zdroj: Rott, 1993; Scherler, 1993; Reynaud, 1993; Barbero, Zanon , 1993.

Významný ústup ledovců od malé doby ledové se shoduje s nárůstem globální teploty atmosféry od pol. 19. století. A následně pak převládá ústup ledovců ve 20. století ve všech částech světa (*Solomina, et al., 2008*).

Současná fluktuace ledovců a ledovcových čapek je systematicky pozorována a měřena již více než století v různých částech světa (*Haeberli, 2004 in Solomina, et al., 2008*). Úbytek alpských ledovců je velice dobře dokumentován cca od konce malé doby ledové (kolem roku 1850) (*Farinotti, et al., 2009*). Zaledněná plocha Alp se od této doby zmenšila přibližně o 35 % a objem ledovců se zmenšil až o 50 % (*Haeberli, Hölzle, 1995*).

¹ data jsou z roku 1973

² data jsou z roku 1969

³ přesný počet ledovců ve Francii dostupná literatura neuvádí

5.4 Metody měření ledovců

V této podkapitole popisují tři základní používané metody měření fluktuace ledovců, které se vyvinuly v průběhu let.

5.4.1 Pozemní měření

U ledovců se provádí dva základní typy pozemního měření.

Bilance ledovce reprezentuje akumulaci a ztrátu sněhu způsobenou ablací. Je složena z plošně zprůměrovaných hodnot, které jsou založeny na měření po celém ledovci. Měření jsou nejméně jednou do roka a jsou pomocí sněhových jímek a vrtaných tyčí (Seiz, Foppa, 2007). Bilance se měří na konci ablační sezóny a je okamžitou reakcí na atmosférické podmínky během roku (Solomina, et al., 2008). Většinou bývá vyjadřována ve vodním ekvivalentu, tedy množství vody vznikající táním (Demek, 1987).

Zatímco změna délky ledovce, udává hodnotu nárůstu nebo úbytku délky ledovcového splazu a je zpožděnou reakcí na lokální klimatické změny (Solomina, et al., 2008).

5.4.2 Využití topografických map

Topografické mapy byly jako první využity jak v Swiss glacier inventory (Paul, 2004), tak v prvním Austrian glacier inventory (Patzelt, 1980) a daly tak podklad pro další navazující výzkumy ledovců. Více viz kap. 5.5 a 5.6.

II. a III. vojenské mapování

První mapy byly publikovány v letech 1807-1834 na základě druhého vojenského mapování Rakouska-Uherska. Byly v měřítku 1 : 28 800. Po roce 1845 začalo vznikat více ledovcových studií, které obsahovaly mapy a rychlost pohybu jednotlivých ledovců (Rott, 1993).

Kompletní rakouské topografické mapy zobrazující území pokryté ledovci jsou dostupné od roku 1893, kdy byly vytvořeny nejstarší mapy (Spezialkarten von Österreich-Ungarn). Tyto mapy ukazují největší rozšíření ledovcového splazu Pasterzského ledovce

(Hall, et al., 2003), za vlády rakousko-uherského císaře Františka Josefa I. jež nechal vytvořit mapovou sbírku zobrazující tehdejší celou Rakousko-Uherskou monarchii (Suedost-institut, 2011). Mapy jsou v měřítku 1 : 75 000 (Suedost-institut, 2011) a také 1 : 25 000 (Rott, 1993).

Od počátku 19. století jsou již dostupné mapy výborné kvality (Hall, et al., 2003).

Daufortovy mapy

První oficiální švýcarské mapování probíhalo v letech 1845-1865 a jednalo se o tzv. Daufortovo mapování. Mapy byly v měřítku 1 : 100 000 a byly jednobarevné. V příloze 1. je vidět, že mapy byly již ve výborné kvalitě a detailně zobrazovaly i oblast Alp (Map.geo.admin.ch, 2011).

Siegfriedovy mapy

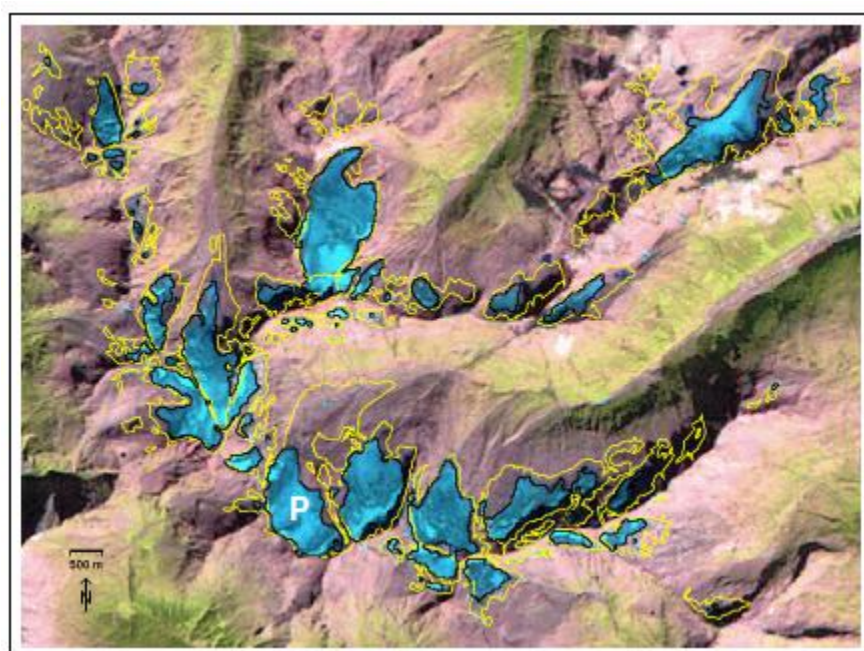
V roce 1870-1926 probíhalo mapování pod vedením Hermanna Siegfrieda. Výsledkem tohoto mapování byl Topografický atlas Švýcarska. Tento atlas obsahuje mapy v měřítku 1 : 25 000 pro oblast zvanou Mittelland, jižní Ticino a Juru. Mapy v měřítku 1 : 50 000 jsou určeny pro oblast Alp. V příloze 2. je uveden mapový list z roku 1882, který zobrazuje oblast Aletschkého ledovce (Universitätsbibliothek Bern, 2011).

5.4.3 Využití geoinformačních systémů a dálkového průzkumu Země.

Všechna dálková měření jsou založena na odrazivosti (albedu) jednotlivých složek povrchu, proto je možné odlišit sníh od vody, nebo třeba pole od lesa.

Od doby kdy byl zprovozněn Multi-spektrální skener (MSS) v roce 1972 a Thematic Mapper (TM) v roce 1984, jsou k dispozici data s vysokým prostorovým rozlišením (56 m x 79 m a 30 m x 30 m) a dosahují téměř celosvětového pokrytí (Paul, 2002). Problémem satelitních snímků Alp je, že jsou většinou pokryty oblačností, tudíž není možná další analýza a snímky se musí pečlivě vybírat (Williams, Ferrigno, 1993).

V době, kdy ještě Landsat nebyl vybaven TM zařízením, byly snímky zobrazovány v nepravých barvách tzv. „false color composites“ (FCCs). Z nich pak bylo možno získat linii přechodu sněhu na led, neboť sníh a led se zobrazují odlišnými barvami (Rott, 1976 in Paul, 2002). Příklad takové analýzy je uveden na obrázku č. 10.

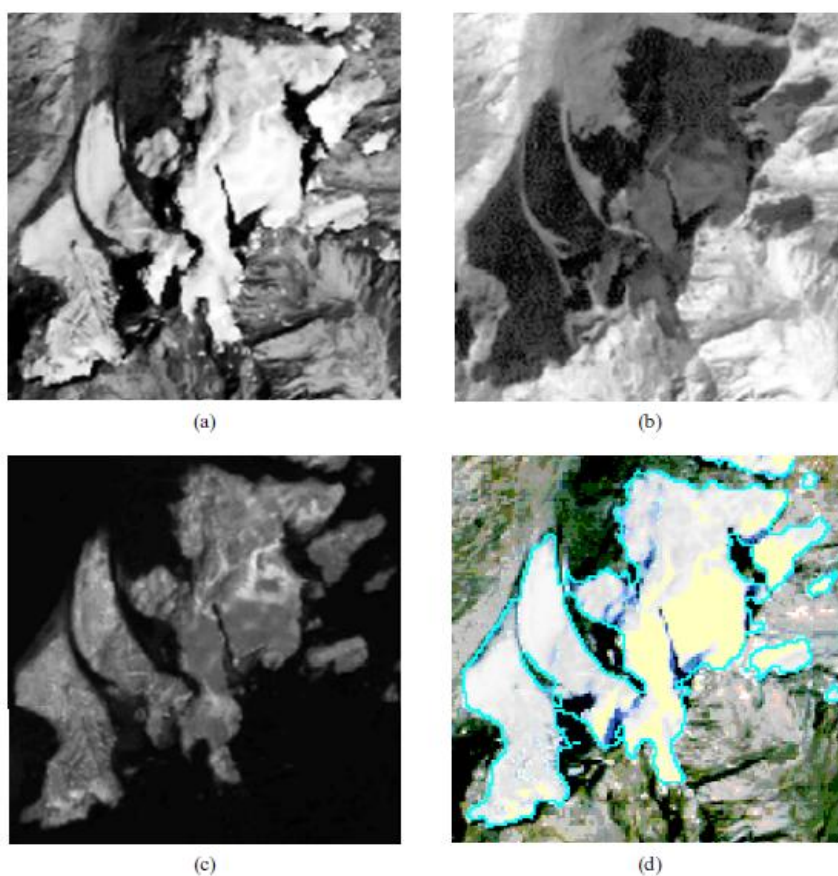


Obr. č. 10: Oblast Rheinwald analyzovaná pomocí FCC (TM543), žlutá linie představuje rozlohu ledovce v roce 1973 a černá v roce 1999.

Zdroj: Paul, 2004

V aplikaci již zmiňovaného poměru pásem TM 4 a TM 5 (TM4/TM5), vzniká problém s vyznačení ledovců pokrytých sutinami z okolních skal (Paul, 2002). Toto se poté musí kalibrovat ručně, či podrobným terénním měřením.

Příklad využití Landsat snímku v geografickém informačním systému (GIS) je uveden na obrázku č. 11. Jedná se o oblast Hochjochferner v rakouských Alpách. Jednotlivá pásma TM 4 (krok. a) a TM 5 (krok. b) umožňují následnou analýzu, jež je zpracována v kroku (c), který zobrazuje poměr TM 4 a TM 5 (TM4/TM5). Na tomto snímku se ledovec spolu se sněhem jeví šedivě, přičemž musí být stanovena hranice, kdy se již nejedná o sníh, ale led. To se provádí pomocí mediánových filtrů (*Paul, 2002*). Ovšem tato problematika již přesahuje hranice této práce. V kroku (d) pak můžeme vidět výslednou linii znázorňující hranici ledovce (*Paul, 2002*).



Obr. č. 11: Využití snímku Landsat při určování rozsahu ledovce, Hochjochferner, 17. září 1992.
 Zdroj: Paul, 2002.

5.5 Švýcarská měření

Jak uvádí Paul (2004), měření švýcarských ledovců je velmi dobře zdokumentováno pro posledních 100 let. Ledovce byly zaznamenány na starých topografických mapách a doplňovány každoročními měřeními změn jejich délky. V roce 1973 proběhlo první tzv. *Swiss glacier inventory*, které je zpracováno v publikaci *Firn und Eis der Schweizer Alpen* (Müller, et al., 1976). Toto měření bylo založeno na leteckých snímcích. Ledovce byly vizualizovány ze starých topografických map, pořízených za Siegfriedského mapování a ukazují tak přibližný rozsah zalednění kolem roku 1850. Byly v měříku 1 : 25 000 a zpracovány podle pokynů UNESCO (Müller, et al., 1976). Na toto mapování navazuje, doplňuje a výrazně rozšiřuje tzv. *New Swiss glacier inventory*, které proběhlo v roce 2000. Toto měření již používá moderních metod založených na satelitních snímcích, které jsou analyzovány prostřednictvím geografického informačního systému a digitálního modelu terénu. *New Swiss glacier inventory* (2000) je také pilotní studií projektu zvaném GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), který byl iniciován USGS (U.S. Geological Survey) na konci 90.let (Paul, 2004). Upravené výsledky ze *Swiss glacier inventory* a *New Swiss glacier inventory* jsou zobrazeny v obrázku č. 12, který ukazuje změnu zalednění vybraných ledovců Švýcarských Alp mezi roky 1850, 1973 a 1998/9⁴. Sloupec *Area class* rozřazuje ledovce do 7 tříd, podle rozlohy v km². A sloupec *Change/10a* ukazuje průměrnou změnu v rozloze za desetiletí. Můžeme zde pozorovat přibližně podobnou změnu fluktuace ledovců mezi jednotlivými velikostními třídami v období 1850-1973, avšak v období 1973-1998/9 jsou tyto změny mezi jednotlivými třídami již značně rozdílné.

Area class	1850		1850 - 1973		1973		1973 - 1998/9	
	count	Area [km ²]	Change / 10a [km ²]	[%]	count	Area [km ²]	Change / 10a [km ²]	[%]
0.1	297	17.27	-0.78	-4.5	164	10.05	-2.60	-25.9
0.5	715	181.29	-7.88	-4.3	448	110.70	-20.17	-18.2
1.0	249	172.51	-6.28	-3.6	131	89.62	-10.44	-11.6
5.0	253	524.38	-13.96	-2.7	141	264.21	-18.86	-7.1
10.0	26	195.53	-3.07	-1.6	36	260.72	-11.26	-4.3
20.0	18	259.87	-3.02	-1.2	13	209.97	-6.85	-3.3
100.0	9	270.50	-2.63	-1.0	5	225.89	-5.19	-2.3
Total	1567	1621.35	-38.30	-2.2	938	1171.16	-75.36	-6.4

Obr. č. 12: Vybrané výsledky *New Swiss glacier inventory*, 2000.
Zdroj: Paul, 2004.

⁴ 1998 probíhalo měření západní části švýcarských Alp a v roce 1999 východní části švýcarských Alp

5.5.1 Současná švýcarská měření

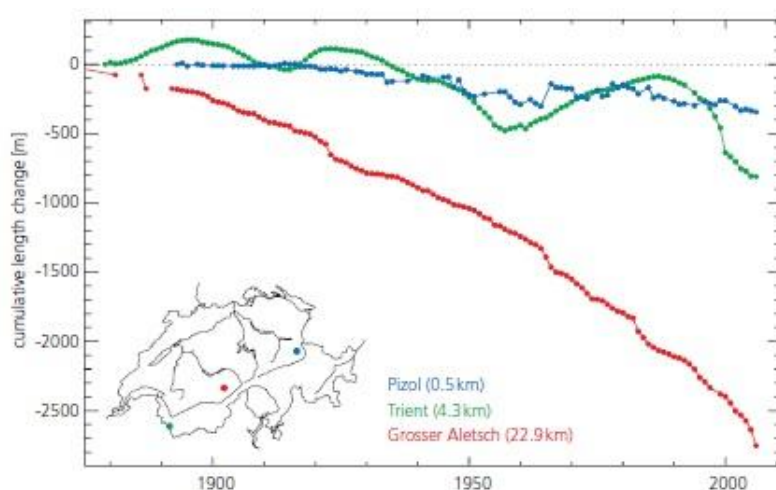
Monitorovací síť zavedená v průběhu let zahrnuje jednotlivá měření (bilance, změna délky, měření teploty a rychlosti toku) ledovců všech velikostí, od malých karových ledovců přes horské ledovce, až po velké údolní ledovce. Ačkoliv jsou poslední dvě jmenované kategorie hojně zastoupeny, 80 % ledovců tvoří ledovce rozlohou menší než 1 km² (Seiz, Foppa, 2007).

Tato měření zajišťuje především *Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology* (VAW), s finanční podporou *Cryospheric Commission* (EKK) ze Švýcarské akademie věd (SCNAT). Jejím záměrem je zapojit již existující měření do *Global Terrestrial Network for Glaciers* (GTN-G), za účelem stanovení budoucí strategie v důležitých otázkách glaciologie, klimatologie aj. a zahrnout moderní technologie (satelitní data, geoinformační systémy, numerické modely), která jsou v poslední době hojně využívána, do monitorovacího programu (Seiz, Foppa, 2007).

Změna délky ledovců

První pravidelné měření délky ledovců ve švýcarských Alpách začíná rokem 1880. Od roku 1893 byla tato data systematicky sbírána v mezinárodně koordinovaných měřeních. Díky souvislému měření, má Švýcarsko jednu z největších monitorovacích sítí na světě. A díky hodnotícím zprávám o ledovcích je pozorování souvislé pro 97 ledovců ze 120 aktuálně pozorovaných (Seiz, Foppa, 2007). Jelikož každý ledovec reaguje poněkud odlišným způsobem, je zde vyvozování jednoznačných závěrů velice obtížné.

Obrázek č. 13 ukazuje, jak velikost ledovce ovlivňuje úbytek a délku trvání výchylek pro tři vybrané švýcarské ledovce, každý jiné rozlohy. Ukazuje odlišné reakce a schopnost adaptace na klimatické změny. Aletschský ledovec, jenž je největším údolním ledovcem Alp, ubývá konstantně již od doby počátku pozorování. Naopak menší horský ledovec Trient vykazuje periodu úbytku ledovcové hmoty v řádu desítek let a malý Pitztolský ledovec vykazuje ještě kratší periodu v řádech několika let (Seiz, Foppa, 2007).

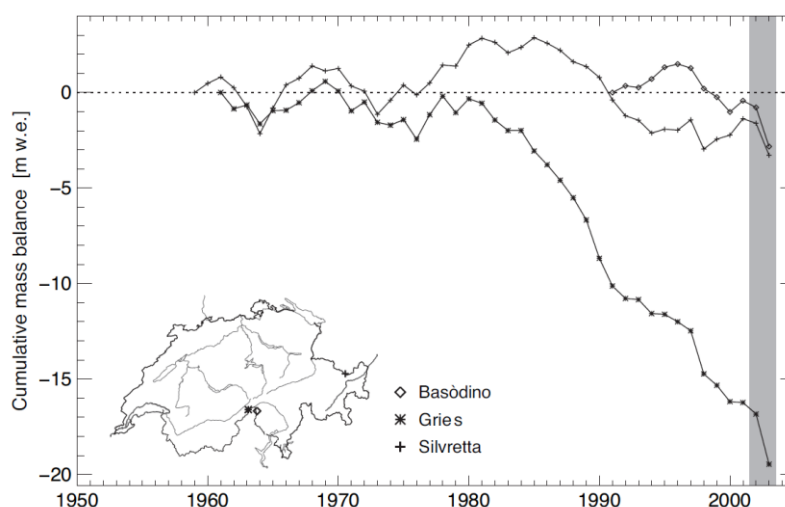


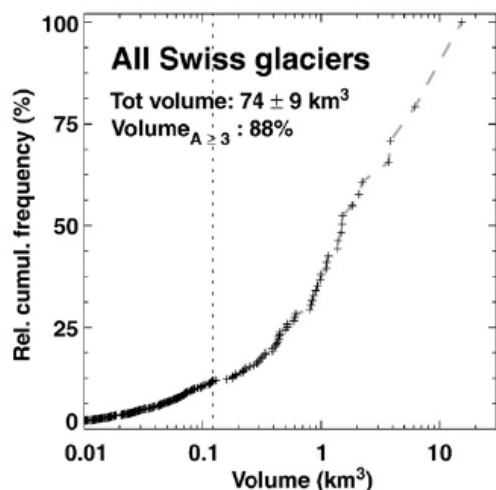
Obr. č. 13: Změna délky vybraných švýcarských ledovců 1870 – 2009.
Zdroj: Seiz, Foppa, 2007

Bilance ledovců

Měření bilance ledovců byla poprvé prováděna na Rhôneském ledovci v období 1884–1910 a dlouhodobá měření jdou zpět do roku 1914 v případě ledovce Silvretta a do roku 1947 pro ledovce Limmern a Plattava. U posledních dvou zmiňovaných bylo měření v roce 1985 přerušeno. Dále jsou však měření prováděna na ledovcích Silvretta (od roku 1914, od roku 1959 s hustší sítí), Gries (od roku 1961) a Basòdino (od roku 1991). Na obrázku č. 14 je vyznačena celková bilance tří švýcarských ledovců Basòdino, Gries a Silvretta, získaná prováděným měřením. Bilance je v grafu vyznačena v jednotkách *m w.e.*, což je v angličtině zkratka pro *meter water equivalent*, tedy *vodní ekvivalent* (viz kap. 5.4.1) (Seiz, Foppa, 2007).

Obr. č. 14: Celková bilance vybraných švýcarských ledovců v letech 1980–2003.
Zdroj: Bauder, et al., 2009.





Obr. č. 15: Švýcarské ledovce podle objemu v roce 1999.

Zdroj: Farinotti, et al., 2009.

Podle Farinottiho, et al. (2009) objem švýcarských ledovců v roce 1999 dosahoval $74 \pm 9 \text{ km}^3$ (tabulka č. 2), přičemž v letech 1999 až 2008 roztálo kolem 12 % tohoto objemu a 3,5 % (což je $2,6 \text{ km}^3$) pouze v jediném roce (2003), kdy bylo neobvykle teplé léto (viz kap. 4.5.3). Průměrná tloušťka ledovců je $70 \pm 8 \text{ m}$. Kolem 88 % ledu je obsaženo v 59 ledovcích, jejichž plocha je větší než 3 km^2 (obr č. 15).

5.5.2 Největší švýcarský ledovec

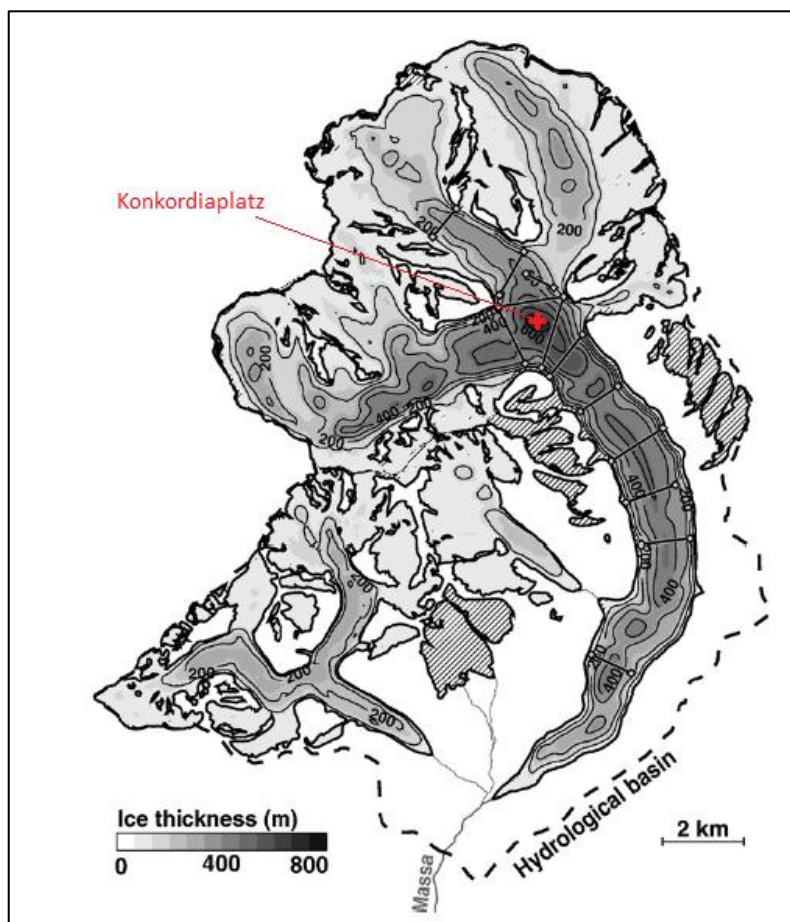
Svojí plochou $82,17 \text{ km}^2$ (1999) je Aletschský ledovec nejdelším a největším ledovcem Alp. Nachází se v oblasti zvané Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn, jež je zařazena na seznamu světového dědictví UNESCO. S rozlohou cca 353 km^2 je tato oblast největší zaledněnou plochou Alp. Skládá se ze 167 ledovců, přičemž 129 z nich je bez názvu a menších než 1 km. Najdeme zde také Fischergletscher, Unteraargletscher, Oberaletschgletscher a dolní Grindelwaldgletcher (Zumbühl, Holzhauser, 2007).



Obr. č. 16: Ledovcový splaz Grosser Aletschgletscher, 2010.
Zdroj: foto autorka

Jak uvádí Farinotti, et al. (2009), Grosse Aletschschgletscher (obr. č. 16) leží v povodí říčky Massa. Toto povodí má rozlohu 195 km^2 a nalezneme zde ještě další dva údolní ledovce (Mittelaletschgletscher a Oberaletschgletscher) a několik menších ledovcových hmot. Zaledněná plocha je 125 km^2 (1999), což je 12 % zalednění Švýcarska. Ovšem odhadovaný objem je $18 \pm 7 \text{ km}^3$ (1999), což je již 24 % objemu všech švýcarských ledovců a poukazuje tak na důležitost velkých ledovců a ledovcové hmoty v nich zadržované.

Největší tloušťka 890 m je na místě zvaném Konkordiaplatz, kde se stýkají tři hlavní ledovcové splazy a tvoří tak ledovcový jazyk Grosser Aletschgletscher (obr. č. 17), který pokračuje jižním směrem v délce cca 15 km (Bauder, et al., 2009). Toto místo je ovšem relativně malé a prokazuje tak, že tloušťky větší jak 800 m jsou spíš raritou v rámci alpských ledovců (Farinotti, et al., 2009).



Obr. č. 17: Prostorové rozložení tloušťky ledovce, povodí řeky Massa v roce 1999.
Zdroj: Farinotti, et al., 2009.

5.6 Rakouská měření

V rakouských Alpách se nachází pouze pět ledovců větších než 10 km² a naprostá většina rakouských ledovců je menší než 1 km² (Rott, 1993).

5.6.1 *Austrian glacier inventory*

Jak uvádí Patzelt (1980), úplné první měření ledovců Východních Alp provedl Richter v roce 1888, když z dostupných topografických map určil jejich rozšíření v roce 1870/1871. Od této doby bylo provedeno mnoho měření, avšak až do roku 1967, nebylo žádné kompletní. Právě v roce 1967 Prof. H. Hoinkes inicioval první *Austrian glacier inventory* (AGI). V září a říjnu roku 1969 na konci ablační sezóny, byly zpracovány první snímky, na kterých je toto mapování založeno. Jednalo se o letecké snímky většinou v měřítku 1 : 30 000 a na základě těchto snímků bylo 87 % ledovců zmapováno v měřítku 1 : 10 000, či 1 : 15 000. Výsledné mapy ukazují hranice ledovce a morény roku 1850 a 1920. Pro zbylých 13 % ledovců byly využity oficiální topografické mapy v měřítku 1 : 25 000 s vyznačením ledovců z roku 1969.

Výsledky AGI: V rakouské části Východních Alp se nacházelo v roce 1969 celkem 918 ledovců s celkovou plochou 540 km² s pravděpodobnou odchylkou ± 10 km² (tabulka č. 2). Předpokládaná tloušťka ledovců byla 40 m a objem ledu v nich byl 21 km³. V Zillertálských Alpách ubylo od roku 1850 do roku 1925 17 % ledu a v roce 1969 to bylo již 44 % z původního stavu v roce 1850. V sušších Ötztalských Alpách reagovaly ledovce menší jak 1 km² 55% úbytkem ledu od roku 1850 až do roku 1969 a ledovce větší jak 10 km² reagovaly úbytkem 25 % ledu (Patzelt, 1980).

Tabulka č. 2: Počet rakouských ledovců

Rakousko	počet	rozloha (rok)[km ²]
ledovců celkem	918	540 \pm 10 (1987)
větší než 4 km ²	25	-
menší než 1 km ²	805	-

Zdroj: Patzelt, 1980.

5.6.2 Využití GIS v rakouských Alpách

Podrobné rakouské měření ledovců s použitím geografických informačních systému bylo provedeno v roce 2002. Výsledky byly prezentovány za pomoci snímků Landsat Thematic Mapper (TM) a data pro změnu ledovců byla získána z *Austrian Glacier inventory*. Jednalo se pozorování v období mezi roky 1969, 1985 a 1992 pro 235 ledovců z Tyrolských Alp. Poměr pásem 4 a 5 (TM), byl využit jako práh pro určování ledovcového pokryvu pro šest sub-regionů (Ötztal, Pitztal, Gurgl, Stubai North, Stubai South a Zillertal). Ledovce o ploše menší než 1 km² se jednoznačně zmenšily v období 1969-1992 cca o 35 % rozlohy v roce 1969. Celková ztráta ledu je kolem 43 km² (18,6 %) z celkové plochy v roce 1969, jež činila 230,5 km². Podíl ledovců menších jak 1 km² se na této celkové ztrátě plochy podílí 59 % (25 km²), přestože tyto malé ledovce zabíraly pouze jednu třetinu plochy ledovců v této oblasti v roce 1969 (Paul, 2002).

5.6.3 Největší rakouský ledovec

S rozlohou 19,8 km² (1969) je Pasterzský ledovec největší v Rakousku (Rott, 1993). Nachází ve Vysokých Taurách (obr. č. 18) východně od řeky Rýn a slézá z masivu Johannesberg (3463 m n.m.) (Hall, et al., 2003).

Každoroční měření Pasterzkého ledovcového splazu je dokumentováno již od roku 1880 a poskytuje dobrý přehled ústupu ledovce, který za toto období ustoupil cca o 1229 m délky (Wakonigg, 1991 in Hall, et al., 2003).



Obr. č. 18: Přibližná poloha Vysokých Taur v Rakousku.

Zdroj: Hall, et al., 2003.

6. Metodika a data

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tato práce se zabývá vlivem klimatických změn na alpské ledovce od malé doby ledové. Základním předpokladem položeným hned v úvodu této práce je reakce alpských ledovců na klimatické změny.

Pro porovnání vývoje zalednění s průměrnými měsíčními teplotami jsem si vybrala Morteratschský ledovec ze švýcarských Alp, neboť data za fluktuaci švýcarských ledovců jsou volně přístupná na rozdíl od dat fluktuace ledovců v rakouských Alpách. Morteratschský ledovec (46°24' s. š., 9°55' v. d.) se nachází v masivu zvaném Bernina, nedaleko od známého městečka Sankt Moritz (kanton Grisons) v blízkosti švýcarských hranic s Itálií (obr.č. 19).



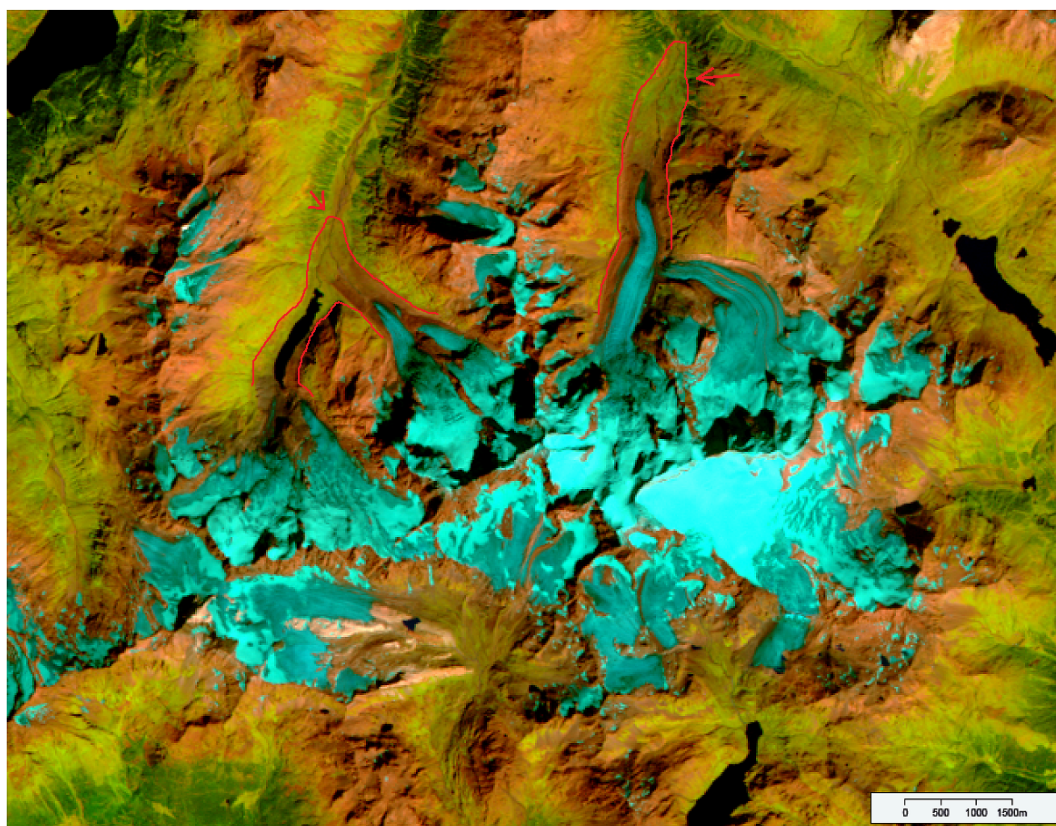
Obr. č. 19: Lokalizace Morteratschského ledovce.

Zdroj: Institute for Marine and Atmospheric Research

Původní myšlenkou práce, bylo použít staré topografické mapy a porovnat je s moderními satelitními snímky Landsatu (1-7), což je uvedeno na obrázku č. 20 a 21. Na obrázku č. 20 je znázorněn vybraný Morteratschský ledovec v době Siegfriedského mapování (1870-1926) a při srovnání s obrázkem č. 21, který znázorňuje oblast Morteratského ledovce v září roku 2009, je vidět mnohonásobně větší zalednění. Pro lepší orientaci jsem červenou barvou znázornila v obrázku č. 21 ústupovou morénu, která je v původním snímku dobře viditelná a ukazuje zalednění zobrazené v obrázku 20. Obrázek č. 21 je zobrazen tzv. FCC (5,4,3) barvami, aby lépe vynikl ledovec. Pro další analýzu starých map a satelitních snímků jsem se musela spokojit pouze s vizuálním porovnáním, těchto snímků, neboť rektifikace starých map, které jsem získala z internetových stránek *Das Geoportal des Bundes* (<http://geo.admin.ch>), by byla značně komplikovaná a přesahovala by hranice této práce. Satelitní snímek, který jsem použila pro tuto část, byl pořízen družicí Landsat a je volně dostupný na internetových stránkách *U.S. Geological Survey* (<http://www.usgs.gov/>). konkrétně se jedná o snímek ze dne 7. září 2009 (path 194, row 028).



Obr. č. 20: Morteratschský ledovec v době Siegfriedského mapování.
 Zdroj: <http://map.geo.admin.ch>

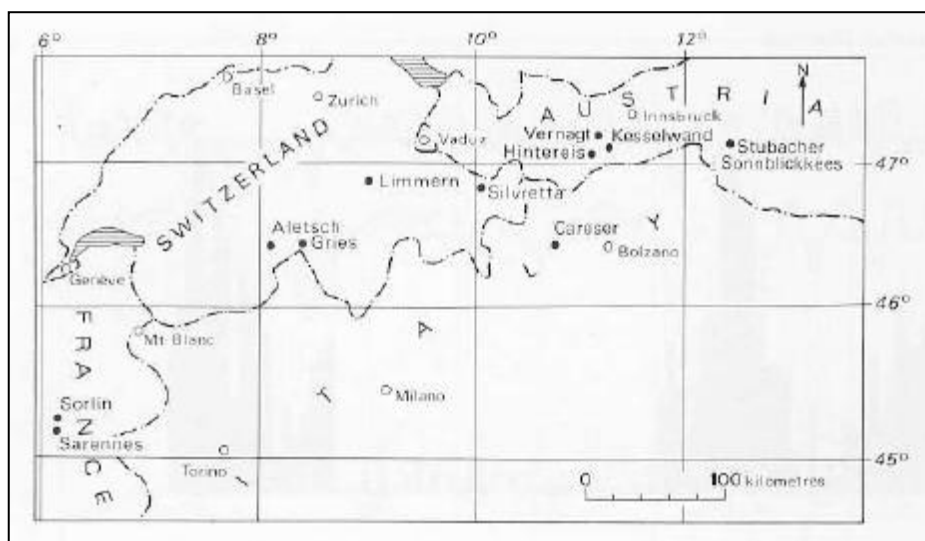


Obr. č. 21: Satelitní snímek oblasti Morteratschského ledovce v FCC barvách, 07-09-2009.
 Zdroj: vlastní zpracování, U.S. Geological Survey.

6.1 Dlouhodobý vývoj teplot a fluktuace ledovců.

V následující podkapitole porovnávám dlouhodobé řady dat fluktuace vybraného Morteratschského ledovce s daty za vývoj průměrných měsíčních teplot rakouské vysokohorské meteorologické stanice Sonnblick (3 106 m n. m.).

Tato stanice leží na vrcholku zvaném Hohe Sonnblick (47,13 °s š., 12,6 °v d.), jenž je jedním z nejvyšších ve Vysokých Taurách a tím i v Rakousku. Nachází se nedaleko ledovce Sonnblickkees (obr. č. 22) a její základy byly položeny roku 1886 z iniciativy meteorologa Juliuse Hanna a s podporou Ignáce Joacha, majitele dolů Rauris. A nejen díky těmto pánům, je dnes možné analyzovat kompletní 124letou řadu meteorologických měření (*Sonnblick observatorium, 2009*). Tato meteorologická stanice byla vybrána právě díky její dlouhodobé řadě meteorologických pozorování a vysoké nadmořské výšce, v níž se nachází. Neboť právě tak získáváme data z nadmořské výšky, v níž se nacházejí ledovce.



Obr. č. 22: Lokalizace Sonnblickkees a ostatních významných ledovců.

Zdroj: Grove, 1988.

Morteratschský ledovec byl vybrán na základě jeho polohy a rozlohy. Nachází se v kantonu Grisons, jež se rozkládá na hranici Itálie a Rakouska a tudíž je blíže meteorologické stanici Sonnblick, než třeba Aletschský ledovec. Dále byl vybrán vzhledem k jeho větší rozloze, jež mu zajišťuje pečlivé pozorování a měření v téměř nepřetržité 130leté řadě.

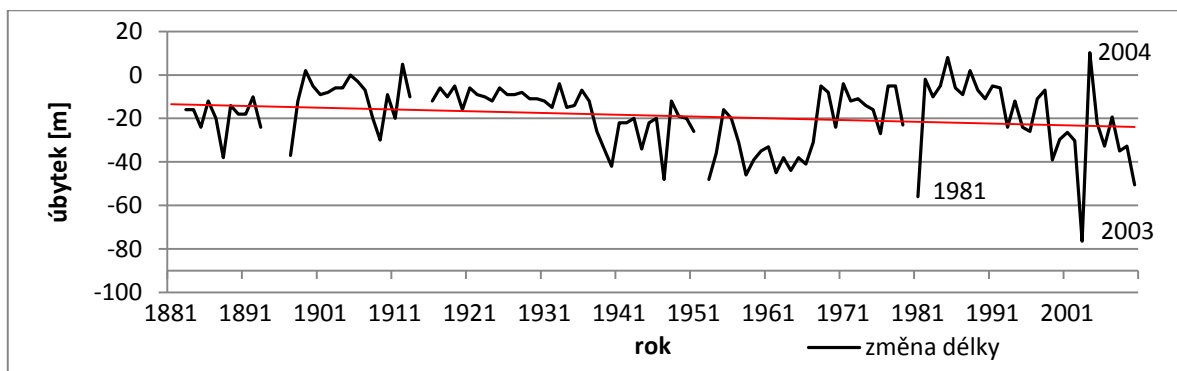
6.2 Data

Data za měsíční teplotní průměry od roku 1886 do roku 2010 z meteorologické stanice, byla velkoryse poskytnuta institucí *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG-Salzburg)*, což je rakouská meteorologická služba, obdoba ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav). V datech za fluktuaci Morteratschského ledovce z období let 1881-2010 chybí pouze roky 1882, 1894, 1896, 1914, 1915, 1952, 1980 a jsou volně ke stažení na internetovém serveru *Sweitzerisches Gletschermessnetz* (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>), jež je pod správou *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH Zürich)*.

6.3 Průměrné teploty 1886 - 2010

Podle zpracované literatury je základním předpokladem postupné zvyšování teploty a tím způsobené tání ledovců. V příloze č. 3 uvádím graf odchylek průměrných měsíčních teplot od průměrné teploty každého měsíce za celé sledované období, shlazených klouzavým oknem 11 let x 3 měsíce, který pomocí studených (modrých) barev znázorňuje teploty podprůměrné a teplými (červenými) barvami naopak teploty nadprůměrné. Klouzavý průměr 11 let byl založen na myšlence vlivu 11letého cyklu slunečních skvrn, jež v tomto intervalu pravidelně osciluje. Je zde vidět celkový trend oteplování, který je výrazný především v letních měsících v období cca 1940-1954 a 1980- současnost. Hodnoty zde dosahují až 1,9 °C nad průměrnými hodnotami sledovaného období. Což dává za vznik pravděpodobně nejvýraznějšímu tání ledovců z let 1869-2010, které je dobře viditelné také v grafu č. 1.

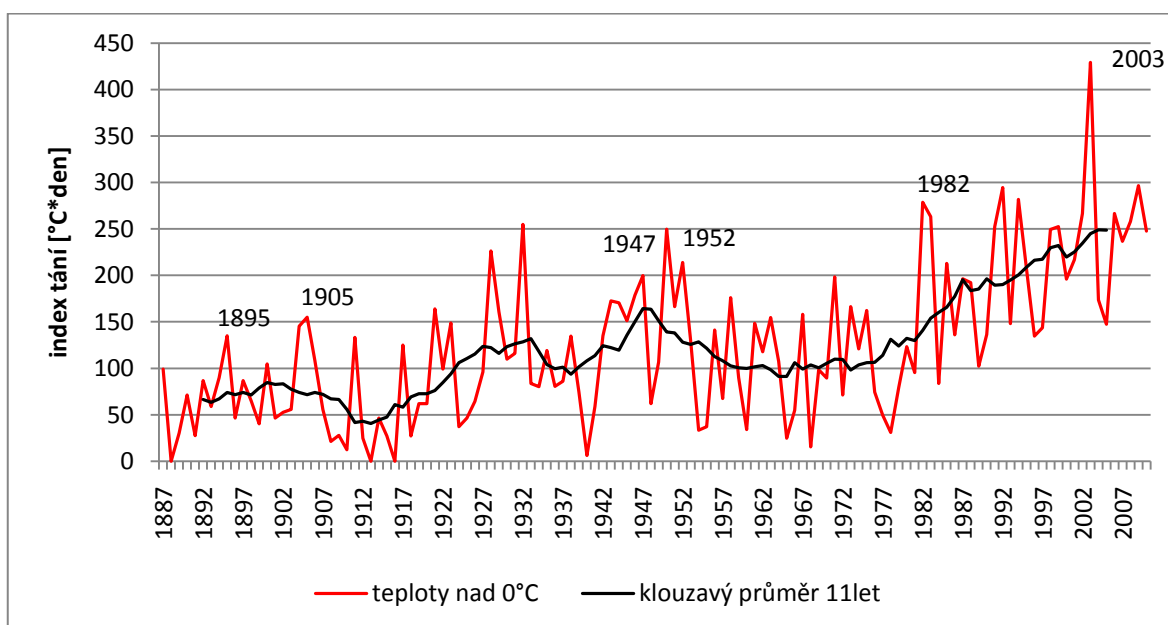
Graf č. 1 uvádí každoroční hodnoty úbytku/nárůstu Morteratschského ledovce a potvrzuje tak postupný rostoucí trend úbytku ledovce. Jedinou výjimkou v tomto období (1980-2010) je rok 2004, který sice v rámci celého Švýcarska nebyl nijak extrémně srážkově bohatý, ovšem v kantonech Valais a Grisons v tomto roce napadla vydatná sněhová pokrývka (*Bauder, Frei, 2009*), díky níž byl na konci roku přírůstek ledovce 10,3 m. Naopak období letních měsíců v letech cca 1900-1933 prokazuje výrazně podprůměrné hodnoty měsíčních průměrů, jež je na křivce fluktuace ledovce velice dobře vidět, jako období podprůměrného úbytku, či dokonce mírného nárůstu ledovce. Také za povšimnutí stojí rok 2003, jež je zmiňován v kapitole 4.5.3, zde se potvrzuje pravidlo, že nejvyšší úbytek či nárůst ledovců závisí hlavně na maximálních teplotách letních měsíců, než na teplotách zimních měsíců.



Graf č. 1: Fluktuace Morteratschského ledovce.

Zdroj: vlastní zpracování, Gletscherberichte (1881-2009).

Délka Morteratschského ledovce se v letech 1881-2010 zmenšila o 2,3 km. Z tohoto množství ovšem během první poloviny sledovaného období do roku 1945 odtálo pouhých 38 %. Zbylých 62 % tedy odtálo během druhé poloviny v letech 1945-2010. Toto je dalším důkazem rapidního nárůstu teplot v druhé polovině 20. století.



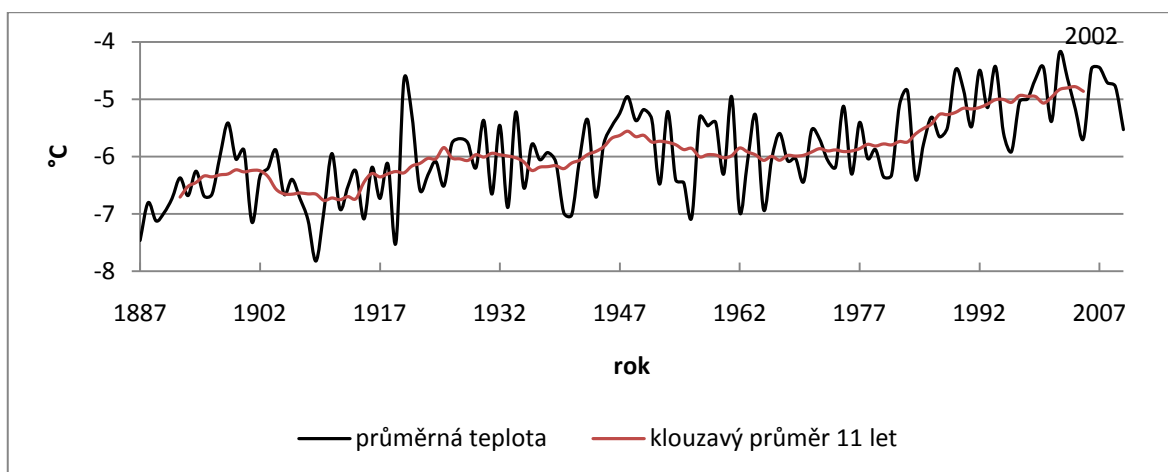
Graf č. 2: Průměrné měsíční teploty vyšší než 0 °C. Sonnblick, 1888-2010.

Zdroj: vlastní zpracování, data od ZAMG - Salzburg.

Graf č. 2 ukazuje průběh veličiny „index tání“. Což je součet násobků průměrné teploty měsíce vyšší než 0 °C a počtu dní v měsíci za každý rok. Tedy údaj podobný součtu kladných denních průměrů teploty vzduchu za každý rok. Ukazuje tak trend postupného zvyšování teplot, obzvláště v posledních 20 letech. Vyjadřuje také roky s největší pravděpodobností vysokého tání ledovců. V porovnání s grafem č. 1 zde

nalezneme shodu v letech zaznamenávající výrazný úbytek ledovce spolu s výrazným průměrným oteplením. Jsou to například vyznačená období 1895-1897, 1947-1953, 1981-1982 a také samozřejmě rok 2003 je velmi výrazný v obou grafech.

V grafu č. 3 sledujeme postupné zvyšování průměrné roční teploty. Rozdíl průměrné teploty mezi roky 1887 a 2010 činí $1,93^{\circ}\text{C}$. A rozdíl mezi první a poslední hodnotou 11letého klouzavého průměru, který shlazuje extrémní hodnoty, je $1,84^{\circ}\text{C}$. Toto je ovšem mnohem větší rozdíl, než zvýšení globální průměrné teploty od nejstudenější fáze malé doby ledové po současnost, která se zvýšila o $0,8^{\circ}\text{C}$ (Lean, Rind, 1999). Zajímavý je fakt, že průměrné roční teploty nemají tak výrazný vliv na tání ledovců, jako extrémní letní teploty. Rok 2002 je v grafu č. 3 vyznačen jako průměrně nejteplejším měsícem celého sledovaného období. Avšak největší podíl na tání ledovců měl již zmiňovaný rok 2003, který měl nižší průměrnou roční teplotu než rok 2002.



Graf č. 3: Vývoj průměrné roční teploty, Sonnblick, 1887-2010.
Zdroj: vlastní zpracování, data od ZAMG Salzburg.

V příloze č 4 předkládám grafy s dlouhodobým vývojem průměrných teplot za každý měsíc v období 1886-2011 naměřené na stanici Sonnblick. Ve všech měsících je vidět převažující trend dlouhodobého oteplování s vysokým nárůstem především v posledních 25 letech. Nejvyšší nárůst průměrných teplot je zaznamenán hlavně v letních měsících, kdy nejvyšších teplot je dosahováno v měsících červenec a srpen. Dlouhodobě vyrovnaný vývoj teplot vykazuje pouze měsíc září, kde není trend dlouhodobého oteplování jasně zřetelný.

7. Diskuse

Jak je dnes již známo alpské ledovce jsou ovlivňovány mnohými klimatickými i jinými faktory. To je například sluneční aktivita, množství srážek, obsah skleníkových plynů v atmosféře a mnoho dalších. Některé z nich jsem popsala v rešeršní části, avšak v této práci jsem se zaměřila především na teploty vzduchu v Alpách, které jsou patrně rozhodující, při ústupu ledovců. Odborné práce mnoha autorů, někteří jsou v této práci uvedeni, ukazují na přibližně shodný vývoj teplot vzduchu, v těch částech Alp, které jsem zmiňovala. Proto jsem se rozhodla pro analýzu teplot vzduchu z meteorologické stanice Sonnblick, nacházející se v Rakousku, s vývojem fluktuace Morteratschského ledovce, nacházející se ve Švýcarsku. Dalším zajímavým rozbohem by bylo porovnání většího množství alpských vysokohorských meteorologických stanic a rozbor aerologických měření z nadmořské výšky, ve které se nacházejí ledovce, podle sondážních stanic v blízkém okolí Alp. Avšak toto nebylo uskutečnitelné v bakalářské práci.

Malá doba ledová je celosvětový fenomén, který se však v různých částech světa projevoval poněkud odlišně. Nejvíce jím byla ovlivněna severní polokoule a zvláště pak Evropa. Ve střední Evropě končí malá doba ledová přibližně v polovině 19. století. A data dostupná pro Sonnblick, jsou tedy unikátní, jelikož poskytují dlouhodobou řadu vývoje teplot po velkou většinu doby následující po malé době ledové. Měření fluktuace ledovců v Alpách iniciovali hlavně švýcarští a následně rakouští vědci, proto jsou dostupná kvalitní dlouhodobá měření cca od roku 1880. Ze začátku jsou tato data dostupná pouze pro několik významných ledovců jako je Rhónský nebo Aletschský ledovec, avšak s postupem času a zvyšováním počtu měřených ledovců, získáváme měření pro stovky alpských ledovců. S pomocí těchto měření dnes můžeme odhadnout rozlohu ledovců v Alpách kolem 2800 km², avšak toto číslo se neustále mění.

Využití dálkového průzkumu Země ve studiu ledovců je poměrně novou a složitou metodou v pozorování ledovců a setkáváme se zde s různými problémy, které ovlivňují výsledek měření. Je to například oblačnost, která znemožňuje satelitům pozorování, a množství sutí pokrývající ledovce. Proto jsem se v této práci rozhodla pouze pro vizuální porovnání satelitního snímku s mapu zobrazující Morteratschský ledovec v době Siegfriedského mapování. Neboť porovnávání různých satelitních snímků, by vyžadovalo rozsáhlejší analýzu nad rámec bakalářské práce.

8. Závěr

V této práci jsem se zaměřila na klimatické změny, ledovce a jejich fluktuaci, staré topografické mapy zobrazující zalednění Alp a možnosti použití satelitních snímků v současném ledovcovém průzkumu.

Dostupné údaje z odborné literatury ukazují, že od malé doby ledové Alpské ledovce výrazně zmenšily svoji plochu. Ve Východních Alpách to bylo dokonce o více než polovinu. Za tuto dobu také roztála velmi výrazná většina nejmenších ledovců, u nichž je ablace nejvýraznější. Rozhodujícím faktorem je zde růst teplot a to hlavně v letních měsících, kdy se v posledních letech zvyšuje nejen rychlost nárůstu teplot ale také výskyt extrémně teplých situací. Teplota vzduchu se postupně zvyšuje po celé Zemi, avšak v horské oblasti jako jsou Alpy, má takovéto oteplování velmi výrazné dopady.

Změny horského zalednění v Alpách, jež proběhly od malé doby ledové jsou velmi citlivým indikátorem změn a kolísání klimatu. Tyto změny se dále projevují v širším regionu, kterého je ČR součástí. Z tohoto důvodu si myslím, že by toto téma mělo být zajímavým i pro české klimatology, zabývající se změnami klimatu. Ti mohou například rozšířit poznatky o vývoji zalednění v Alpách pomocí studia změn cirkulačních faktorů klimatu ve střední Evropě metodami dynamické klimatologie, jehož součástí může být i studium například anticyklonálního (volného) fěnu. Tato práce je pouze stručným úvodem a náhledem do studia fluktuace ledovců a změn klimatických faktorů v Alpách. Některé získané poznatky by mohly být dále využity pro účely výuky klimatologie na Přírodovědecké fakultě Karlovy univerzity.

9. SEZNAM LITERATURY

9.1 Bibliografie

BARBERO, R. S. - ZANON, G. The Italian Alps. Williams, R. S.- Ferrigno, J. G. (Eds.), *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1993. č. 1386-E-1.

BARRY, R.G. - CHORLEY, V. R. Atmosphere, weather and climate. 8.edition. London: Routledge, 2003. ISBN 0-415-27170-3.

BAUDER, A. – FREI, CH. Weather and Climate. In *The Swiss Glaciers 2003/2004 and 2004/2005. Glaciological Report No. 125/126*. Bauder, A. - Rüeegg, R. (Eds.). Zürich: Cryosperic Commision (EKK), 2009. s. 7-14.

BAUDER, A. et al. Mass Balance. In *The Swiss Glaciers 2003/2004 and 2004/2005. Glaciological Report No. 125/126*. Bauder, A. - Rüeegg, R. (Eds.). Zürich: Cryosperic Commision (EKK), 2009. s. 29-54.

BEHRINGER, W. *Kulturní dějiny klimatu, Od malé doby ledové po globální oteplování*. Přeložil Vladimír Cinke. 1. vydání. Praha: Nakladatelství Paseka, 2010. 408 s. ISBN 978-80-7432-022-4.

BIČÍK, I. a kol. *Školní atlas dnešního světa*. 1.vydání. Praha: Terra, 2000. 175 s. ISBN 80-902282-2-4.

BRÁZDIL, R. Změny a kolísání klimatu. In *Fyzická geografie I*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1984. kapitola 2.8, s. 132-141. ISBN 14-383-84.

DEMEK, J. *Obecná geomorfologie*. Academia Praha. Československá akademie věd. 1. vyd. 1987. 480 s.

FARINOTTI, D. et al. An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 2009, vol. 68, s. 225-231.

GROVE, J. M. *The Little Ice Age*. 1. vydání. Methuen: London, 1988. ISBN 0-416-31540-2.

HAEBERLI, W. - HOELZLE, M. Application of inventory data for estimating characteristic of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with European Alps. *Annals of Glaciology*, 1995, no. 21, s. 206-212.

HALL, D. K. et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 68, s. 566-577.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Houghton, J.T. et al. Cambridge: University Press, 1995. ISBN 0-521-56436-0.

KOLÁŘ, J. - HALOUNOVÁ, L. - PAVELKA, K. *Dálkový průzkum Země 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01567-X.

KRÁL, V. *Fyzická geografie Evropy*. 1.vydání. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-200-0684-2.

KŘÍŽ, H. Hydrogeografie. In *Základy fyzické geografie*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1982. ISBN 14-488-82.

LEAN, J. - BEER, J. - BRADLEY, R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implication for climate change. *Geophysical research letters*, 1995, vol. 22, no. 23, s. 3195-3198.

LEAN, J., RIND, D. Evaluating sun-climate relationship since the Little Ice Age. *Journal of Atmospheric and Solar.Terrestrial Physics*, 1999, no. 61, s. 25-36.

MÜLLER, F. et al. *Firn und Eis der Schweizer Alpen. Gletscherinventar*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, Geographisches Institut, 1976.

NETOPIL, R. a kol. *Fyzická geografie I*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1984. ISBN 14-383-84.

PATZELT, G. The Austrian glacier inventory: status and first results. In *World Glacier Inventory: International Association of Hydrological Sciences-Association Internationale des Sciences Hydrologiques Publication No. 126*, 1980, s. 181-183.

PAUL, F. Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 TM and Austrian Glacier Inventory data. *Int. J. Remote Sensing*, 2002, vol. 23, no. 4, s. 787-799.

PAUL, F. *The New Swiss Glacier Inventory 2000, Application of remote sensing and GIS*, Zürich, 2004. 194 s. PhD thesis. Department of Geography, University of Zurich. Supervisor of dissertation Prof. Dr. Wilfried Haeberli.

PROŠEK, P. Základní meteorologické prvky a jejich klimatologické charakteristiky. In *Fyzická geografie I*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1984. kapitola 2.3, s. 40-93. ISBN 14-383-84.

REYNAUD, L. The French Alps. Williams, R. S.- Ferrigno, J. G. (Eds.), *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1993. č. 1386-E-1.

ROTT, H. The Austrian Alps. In *Glaciers of Europe-glaciers of the Alps*. Williams, R. S.- Ferrigno, J. G. (Eds.), *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1993. č. 1386-E-1. s. E6-E13.

SEIZ, G. - FOPPA, N. *National Climate Observing System (GCOS Switzerland)*. Publication of the Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss and ProClim, 2007. 92 s.

SCHÄR, CH. et al. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004, vol. 427, s. 332-336.

SCHERLER, K. E. The Swiss Alps. Williams, R. S.- Ferrigno, J. G. (Eds.), *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1993. č. 1386-E-1.

SCHWARZBACH, M. *Das Klima der Vorzeit, Eine Einführung in die Paläoklimatologie*. Stuttgart: Ferdinand Enke, 1961, 2. Auflage. 275 s.

SLÁDEK, I. Mění se naše klima? *Sborník referátů k XVI. sjezdu Československé geografické společnosti v Čělákovících ve dnech 2.-6. 7. 1984*. Brno: Geografický ústav ČSAV, 1984.

SOLOMINA, O. et al. Historical and Holocene glacier-climate variations: General concepts and overview. *Global and Planetary Change*, 2008, no. 60, s. 1-9.

VOTÝPKA, J. *Fyzická geografie Evropy*. 1.vydání. Praha: Karolinum, 1994. ISBN 382-130-94.

VYSOUDIL, M. *Meteorologie a klimatologie*. 1. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. ISBN 80-244-08759.

WILLIAMS, R. S. - FERRIGNO, J. G. Satellite image atlas of glaciers of the World-Glaciers of Europe. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 1993. no. 1386-E.

ZUMBÜHL, H. J. - HOLZHAUSER, H. Glaziologie – Annäherung an 3500 Jahre Gletschergeschichte. In *Welt der Alpen – Erbe der Welt*. 1.Auflage. Bern: Haupt, 2007. Kapitel 3, 47–72.

9.2 Internetové zdroje

Institute for Marine and Atmospheric Research (IMAU). *The Morteratschgletscher project..* [online]. [cit. 2011-5-6]. Dostupné z: http://www.phys.uu.nl/~oerlemns/site_Mort/menu_1.html.

Map.geo.admin.ch. *Das Geoportal des Bundes*. [online]. Last revision 20.4.2011. [cit. 2011-5-20]. Dostupné z: <http://map.geo.admin.ch>.

RITTER, M. E. *The Physical Environment: an Introduction to Physical Geography*. [online]. 2006. Last revision 10.1.2009. [cit. 2011-5-6]. Dostupné z: http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/title_page.html.

Sonnblick observatorium [online]. [cit. 2001-4-19]. Dostupné z: <http://www.sonnblick.net/portal/content/view/17/227/lang.de/>.

Südost-Institut. *Spezialkarte der Österreichisch-Ungarischen Monarchie <1:75000>*. [online], [cit. 2011-4-2]. Dostupné z URL: <http://www.suedost-institut.de/bibliothek/bestand/karten/spezialkarte.htm>.

Universitätsbibliothek Bern. *Siegfriedkarte digital*. [online], Last revision 4.4.2011 [cit. 2011-5-22]. Dostupné z: http://www.stub.unibe.ch/maps/ta/gallery/Siegfriedkarte_digital_--_TA_493_1882.htm.

WALDINGER, R. *The spatial distribution of alpine glaciers and snowlines: influencing factors and controls*. [online]. Last revision 5.10.1999 [cit. 10-5-2011]. Dostupné z: <http://www.utexas.edu/depts/grg/hudson/grg394k/studentprojects/waldinger/waldinger.html>.

9.3 Zdroje dat:

Landsat snímky:

U.S. Geological Survey. *Landsat Missions*. [online]. Last revision 30.12.2010. [cit. 2011-5-10]. Dostupné z: <http://landsat.usgs.gov>.

Fluktuace ledovců:

Gletscherberichte (1881-2009). "*Die Gletscher der Schweizer Alpen*", Jahrbücher der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) herausgegeben seit 1964 durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. No. 1-126, (<http://glaciology.ethz.ch/swiss-glaciers/>).

Průměrné měsíční teploty – Sonnblick:

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik A 5020 Salzburg, Freisaalweg 16.

10. Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. 1: DAUFORTOVA MAPA ALETCHSKÉHO LEDOVCE.....	- 53 -
PŘÍLOHA Č. 2: SIEGFRIEDOVA MAPA ALETCHSKÉHO LEDOVCE, 1882.	- 54 -
PŘÍLOHA Č. 3: ODCHYLKY MĚSÍCŮ OD PRŮMĚRNÝCH MĚSÍČNÍCH TEPLOT, SONNBLICK 1886-2011.	- 55 -
PŘÍLOHA Č. 4: PRŮMĚRNÉ TEPLoty PRO JEDNOTLIVÉ MĚSÍCE, 1886-2011, SONNBLICK.	- 56 -

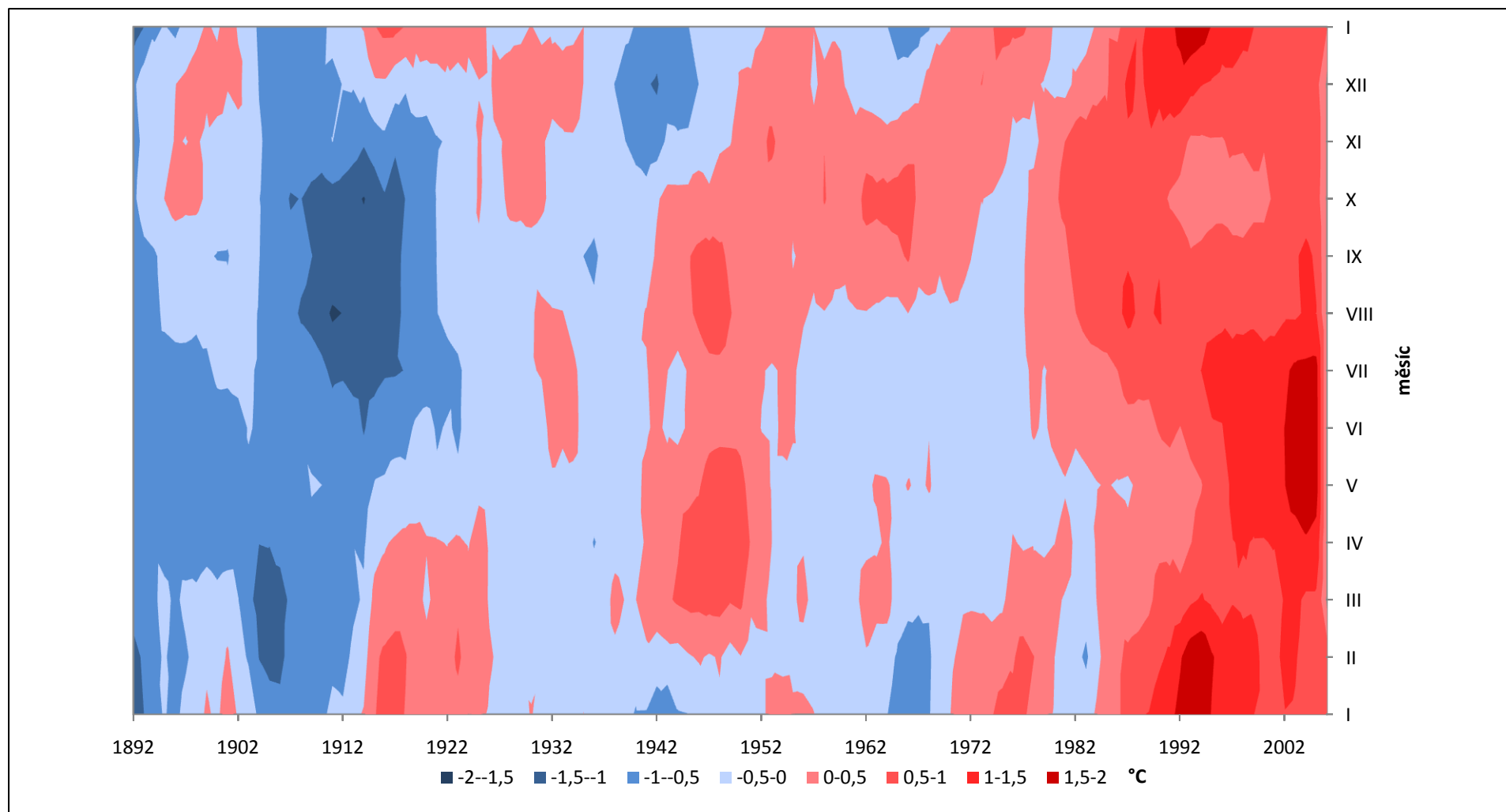


Příloha č. 1: Daufortova mapa Aletschského ledovce
Zdroj: Map.geo.admin.ch.



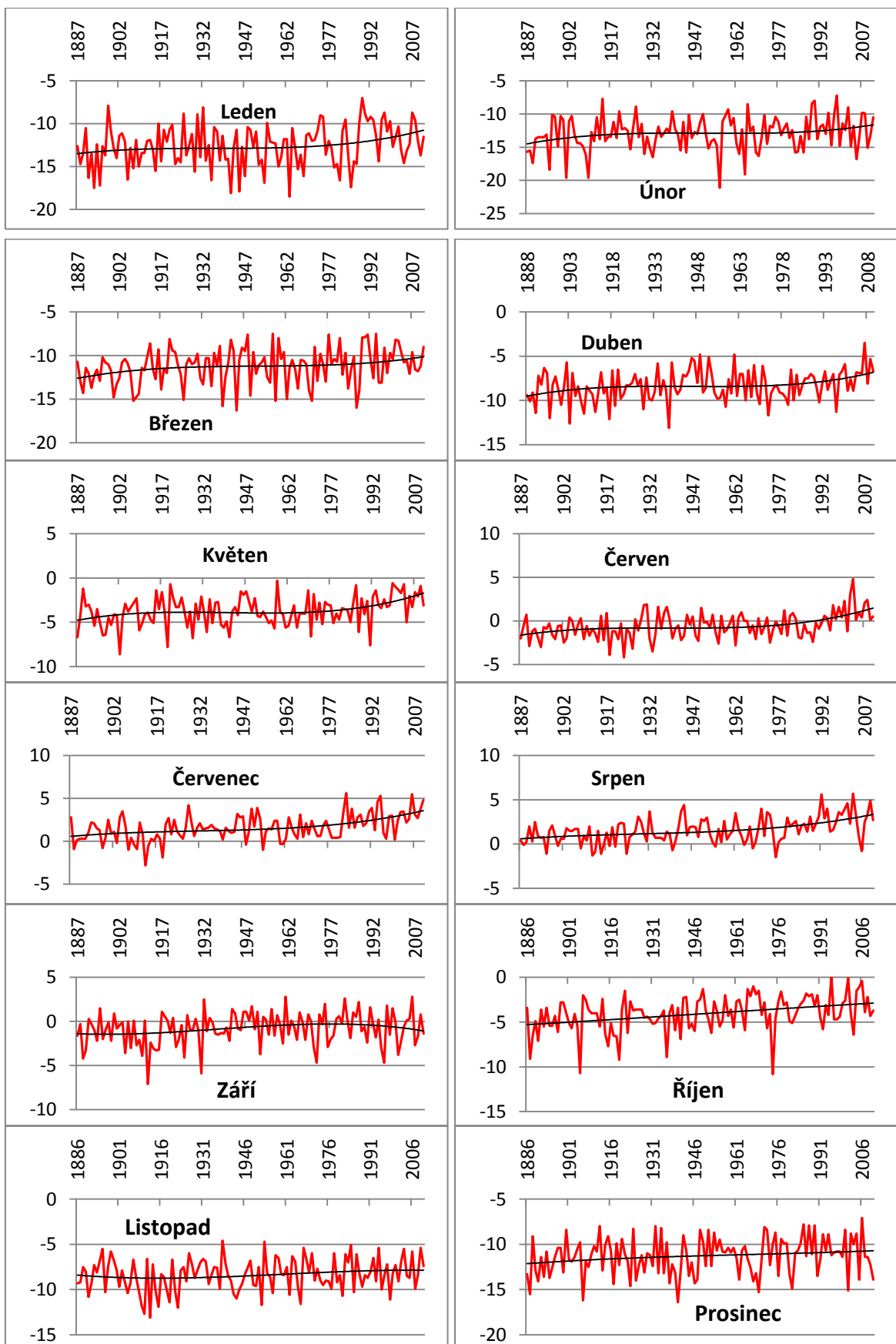
Příloha č. 2: Siegfriedova mapa Aletschského ledovce, 1882.

Zdroj: Universitätsbibliothek Bern.



Příloha č. 3: Odchyly měsíců od průměrných měsíčních teplot, Sonnblick 1886-2011.

Zdroj: vlastní zpracování, data od ZAMG Salzburg.



Příloha č. 4: Průměrné teploty pro jednotlivé měsíce, 1886-2011, Sonnblick.
Zdroj: vlastní zpracování, data: ZAMG Salzburg.